

Direktor

Pukovnik

SLAVOLJUB JOVANČIĆ

UREĐIVAČKI ODBOR

General-major

dr MILUN KOKANOVIĆ, dipl. inž.

(predsednik Odbora)

General-potpukovnik

dr SLOBODAN BURSAC, dipl. inž.

General-potpukovnik

BRANISLAV OBRADOVIĆ, dipl. inž.

General-potpukovnik

dr SINIŠA BOROVIĆ, dipl. inž.

General-potpukovnik

dr JUGOSLAV KODŽOPELJIĆ, dipl. inž.

General-major

MILAN UZELAC, dipl. inž.

General-major

RADOSLAV BABIĆ, dipl. inž.

Pukovnik

dr MILENKO ŽIVALJEVIĆ, dipl. inž.

(zamenik predsednika Odbora)

Pukovnik

SRBOLJUB PETROVIĆ, dipl. inž.

Profesor

dr MOMČILO MILINOVIĆ, dipl. inž.

Profesor

dr MILIĆ STOJIĆ, dipl. inž.

Pukovnik

dr RADOVAN MAKSIĆ, dipl. inž.

Pukovnik

dr MILOVAN ČIROVIĆ, dipl. inž.

Pukovnik

dr BRANKO ĐEDOVIĆ, dipl. inž.

Pukovnik

dr DRAGUTIN JOVANOVIĆ, dipl. inž.

Pukovnik

dr SVETOMIR MINIĆ, dipl. inž.

Pukovnik

dr ILIJA ZAGORAC, dipl. inž.

Pukovnik

DRAGOMIR KRSTOVIĆ, dipl. inž.

Pukovnik

VOJISLAV MILINKOVIĆ, dipl. inž.

Pukovnik

mr RADOMIR ĐUKIĆ, dipl. inž.

Potpukovnik

sc STEVAN JOSIFOVIĆ, dipl. inž.

(sekretar Odbora)

\* \* \*

Glavni i odgovorni urednik

Potpukovnik

sc Stevan Josifović, dipl. inž.

(tel. 646-277)

Sekretar redakcije

Zora Pavličević

(tel. 641-795, vojni 22-431)

Adresa redakcije: VOJNOTEHNIČKI

GLASNIK – BEOGRAD, Balkanska 53.

Preplata tel.-fax: 3612-506, žiro-račun: 40818-

637-9-6319 za VIZ/VTG, poziv na broj 963/054.

Rukopisi se ne vraćaju. Štampa: Vojna štampa-

rija – Beograd, Generala Ždanova 40b.

STRUČNI I NAUČNI ČASOPIS  
VOJSKE JUGOSLAVIJEVOJNOTEHNIČKI  
G L A S N I K

6

*Čitaocima  
i saradnicima  
čestitamo*

*Novu  
2002.  
godinu*

*Redakcija*

## SADRŽAJ

<b>Dr Petar Stanojević,</b> major, dipl. inž. <b>Vladimir Bukvić,</b> major, dipl. inž. <b>Dr Vasilije Mišković,</b> pukovnik, dipl. inž.	IZBOR I ANALIZA FAKTORA KOJI UTIČU NA SISTEM ODRŽAVANJA . . . . .	541
<b>Dr Dragutin Lj. Debeljković,</b> dipl. inž. <b>Dr Mića B. Jovanović,</b> dipl. inž. <b>Dr Stevan A. Milinković,</b> dipl. inž.	ANALIZA ROBUSTNOSTI STABILNOSTI LINEARNIH STACIONARNIH SINGULARNIH SISTEMA AUTO- MATSKOG UPRAVLJANJA . . . . .	555
<b>Mr Obrad Čabarkapa,</b> major, dipl. inž. <b>Dr Ljubiša Tančić,</b> pukovnik, dipl. inž.	KOREKCIJA TEORIJSKIH I EKSPERIMENTALNIH RE- ZULTATA JEDINIČNE BRZINE SAGOREVANJA BA- RUTA U CEVI ORUŽJA . . . . .	571
<b>Dr Zoran Ristić,</b> pukovnik, dipl. inž. <b>Sc Slobodan Ilić,</b> kapetan I klase, dipl. inž. <b>Mr Mile Davidović,</b> dipl. inž.	ODREĐIVANJE OPTIMALNIH VREDNOSTI IZLAZ- NIH PARAMETARA HIDRAULIČNE KOČNICE TRZA- NJA ARTILJERJSKOG ORUĐA . . . . .	580
<b>Dr Vlado N. Radić,</b> pukovnik, dipl. inž.	ANALIZA DEJSTVA METALNOG DISKA NA OKLOP- NA BORBENA VOZILA I MOGUĆNOSTI ZAŠTITE .	595
<b>Mr Zoran Građin,</b> potpukovnik, dipl. inž.	UTICAJ TRIBOLOGIJE MOTORA SUS NA SMANJENJE TRENJA I EKOLOGIJU . . . . .	612
<b>Profesor dr Miloško Jevtović,</b> dipl. inž.	ANALIZA KVALITETA USLUGA MULTIMEDIJALNIH TELEKOMUNIKACIONIH MREŽA . . . . .	622
<b>Krsta Brčić,</b> dipl. inž.	SISTEM ZA UPRAVLJANJE OPREMOM NA AUTOMA- TIZOVANIM VEŽBOVNIM POLIGONIMA NA BAZI PROGRAMABILNIH KONTROLERA I PERSONAL- NOG RAČUNARA . . . . .	638
<b>Dušan Marjanov,</b> dipl. inž.	SATELITSKI SISTEM ZA GLOBALNO POZICIONIRA- NJE GLONASS . . . . .	651
<b>Vladislav Mišković,</b> potpukovnik, dipl. inž.	INFOFEST 2001 – Prikaz naučno-stručnog skupa – . . . . .	654



**Dr Petar Stanojević,**  
major, dipl. inž.  
**Vladimir Bukvić,**  
major, dipl. inž.

**Dr Vasilije Mišković,**  
pukovnik, dipl. inž.  
Vojna akademija VJ, Odsjek logistike,  
Beograd

## IZBOR I ANALIZA FAKTORA KOJI UTIČU NA SISTEM ODRŽAVANJA

– nastavak iz broja 4–5/2001 –

UDC: 62–7.001.57

### Pristup istraživanju

Može se očekivati da će se efekti određenih unapređenja jasnije manifestovati kod „velikih“ SOd i da su oni radi toga povoljniji za istraživanje u vidu objekta za ovakav eksperiment. Međutim, merenje efekata je kod ovakvih sistema daleko teže. Zbog karakteristike SOd da se većina procesa koji se u njemu odigravaju može opisati slučajnim promenljivima, da ih često karakteriše nestacionarnost, veliki broj limitirajućih faktora, a da treba uvažavati specifična upravljačka rešenja, najbolji način za projektovanje SOd-a, a u vezi s tim i za potrebna izučavanja, jeste primena metoda matematičkog modelovanja i simulacije. Da bi se sagledala ukupnost pojedinih efekata karakteristični SOd mora se posmatrati kao celina. Njegov model u tom slučaju mora obuhvatiti sve karakteristične tokove (ljudi, tehnoloških elemenata, tehnoloških zahteva, materijala, r/d, informacija, ...). Modelovanje i simulacija može se obavljati za sve kombinacije konceptijskih, tehnoloških i organizacionih i drugih varijanti SOd-a. Kreirana varijantna rešenja SOd, zajedno sa sistemom kriterijuma, čine specifičan eksperimentalni okvir. Kvantifikacija pokazatelja uspešnosti i poređenje varijantnih rešenja prvenstveno se zasniva na metodo-

logiji modelovanja i simulacije kao, u ovom slučaju, najpogodnijih kvantitativnih metoda. Metodologija modelovanja i simulacije posebno je pogodna, jer omogućava da se nakon stvaranja osnovnog modela SOd izvedu četiri vrste eksperimenata: podešavanje odgovarajućih parametara i pokazatelja (tune existing parameters), analiza osetljivosti, strukturalni redizajn i procedure istraživanja „šta-ako“. Sve to se može povezati sa odgovarajućom analizom cost-benefit. U ovom slučaju ova metodologija je pogodna zbog mogućnosti izvođenja analiza osetljivosti i procedure istraživanja „šta-ako“.

Konkretno istraživanje izvršeno je u okviru projektovanja dva karakteristična sistema održavanja [19, 20]. I jedan i drugi spadaju u grupu višenivojskih (4 nivoa), prostorno razuđenih lokacija (u prvom slučaju 16 lokacija prvog nivoa, četiri drugog, jedan trećeg i jedan četvrtog nivoa, a u drugom 67 lokacija prvog nivoa, devet drugog, jedan trećeg i jedan četvrtog nivoa SOd) u kojima se održava veći broj složenih, skupih i važnih TS (u prvom slučaju 640, a u drugom 4 880). Broj karakterističnih vrsta postupaka održavanja je veliki i delimično različit u zavisnosti od TS. Potrebni resursi (elementi sistema) mnogobrojni su i složeni po strukturi i karakteru. U prvom slučaju se istraživalo na konceptijskim, tehnolo-

škim i organizacionim varijantama rešenja, dok se u drugom istraživalo samo na organizaciji (tehnologija i koncepcija su uzete kao nepromenljive). Ciljevi istraživanja bili su identični – stvoriti uspješniji konkretni SOD.

Istraživani realni SOD su po mnogo čemu specifični, pa se i rezultati dobijeni istraživanjem mogu smatrati, u formalnom smislu, pojedinačnim i specifičnim. Međutim, po primenjenoj metodologiji, broju relevantnih činilaca koji su uzeti u obzir, obimu modelovanih procesa, sličnosti dobijenih rezultata, itd., može se zaključiti da je njihova primenljivost znatno veća. Naime, istraživanje prvog SOD [19] prethodilo je drugom [20], pa su se jasnije mogli odrediti problemi koje treba izučavati i tendencije, a kroz međusobno poređenje rezultata brže doći do saznanja o mogućim zakonitostima i uzrocima razlika.

### **Rezultati eksperimenta**

Eksperiment je organizovan u više celina:

- izbor najbolje tehnološke varijante rešenja (za prvi SOD);
- izbor najbolje varijante organizacione strukture (koja sadrži najbolju tehnološku varijantu);
- eksperiment sa određivanjem uticaja razmatranih faktora na pokazatelje uspešnosti sistema održavanja.

U okviru navedenih celina vršeno je provođenje kompletnih eksperimenata za dobijanje kriterijumskih vrednosti – pokazatelja uspešnosti i analiza rezultata dobijenih eksperimentisanjem.

Analiziran je uticaj gotovo svih merljivih faktora navedenih u tabeli 1 sem rizika iznenadnih otkaza i verovatnoće regeneracije i proizvodnje r/d. Veličine

ovih faktora moraju se meriti u samom realnom SOD i zavise od konkretnih karakteristika TS. Interval strpljivosti, kao relevantan faktor, već je ugrađen u model i njegov uticaj se ogleda u veličini gubitaka TS (broju neopsluženih zahteva za održavanje), tako da ga ne treba posebno razmatrati. Uticaj logističkog vremena zastoja može se na osnovu dobijenih rezultata i posredno utvrditi, a uticaj ostalih faktora izučavan je na primeru bar jednog od modelovanih SOD, a za većinu i na oba slučaja. Analizom uticaja pojedinih faktora na oba slučaja modelovanih SOD dobija se mogućnost međusobnog poređenja, ali i mogućnost nalaženja uzroka pri ispoljenim razlikama. Dobijeni rezultati time dobijaju na opštosti. Uz osnovne rezultate dobijeni su i prateći koji će, takođe, biti prikazani, jer govore o karakteru nekih pojava i karakterističnih rešenja u SOD.

Eksperimenti su sprovedeni na „četiri nivoa“ u skladu sa nivoima SOD, tj. od nivoa modularne jedinice podržavnog sistema, preko višeg, srednjeg do najvišeg projektovanog nivoa ili celine SOD-a. Ovde će, međutim, biti prikazani rezultati vezani, uglavnom, za nivo celine SOD uz neophodne komentare ostalih rezultata po nižim celinama. Koraci variranja vrednosti istraživanih faktora uzimani su tako da ilustruju ravnosmernost promene, a raspon variranja zadavan je prema logičkoj analizi posmatranih faktora ili prema upoređenju sa do sada objavljenim podacima u literaturi.

Za eksperimentalnu osnovu uzeto je najpovoljnije organizaciono-tehnološko rešenje projektovanog SOD-a (i u jednom i u drugom slučaju), identični eksperimentalni okvir i „scenario“, kao i za lošije varijante. Ono predstavlja referentnu tačku eksperimenata. Najpovoljnije

rešenje podrazumeva izvođenje radnji održavanja i ešeloniranje  $r/d$  na nivou modularnih jedinica i svim ostalim nivoima, kao i matično-funkcionalni tip organizacione strukture podržavanog sistema po pitanju održavanja. Veličine osnovnih parametara određene su na sledeći način: tačnost dijagnostike određena je kao verovatnoća tačne dijagnostike od 0,9, verovatnoća kvalitetnog održavanja (bez reklamacija) iznosi 0,9, verovatnoća zadovoljenja tražnje za  $r/d$  bez čekanja po nivoima sistema određena je prema trenutnim uslovima koji vladaju u realnim SOd (prosečno oko 0,5), dok je autonomija nivoa SOd (verovatnoća da se radnja održavanja može izvršiti na nivou koji je za to nadležan) određena inicijalno kao 0,75 za nivo modularne celine, 0,95 za viši i srednji nivo i 1 za najviši nivo SOd-a. Osnovna merodavna veličina za dimenzionisanje svih tehnoloških elemenata (TE) jeste verovatnoća opsluge od 0,95.

Eksperimenti su vršeni, uglavnom, smanjenjem vrednosti ulaznih veličina zbog toga što je „projektna godina“ izabrana u odnosu na ekstremno nepovoljne uslove za funkcionisanje SOd-a, odnosno ekstremno veliki broj zahteva za održavanje (TZ).

#### *Broj TZ (aktivnosti, postupaka) održavanja*

Adekvatna preventiva doprinosi smanjenju rizika od iznenadnih otkaza i smanjenju broja otkaza. Ugradnjom samodijagnostičke opreme i primenom koncepta održavanja prema stanju, takođe, može se umanjiti potreba za preventivnim radnjama održavanja. Smanjenje broja otkaza može se postići i povećanjem pouzdanosti TS u procesu konstruisanja,

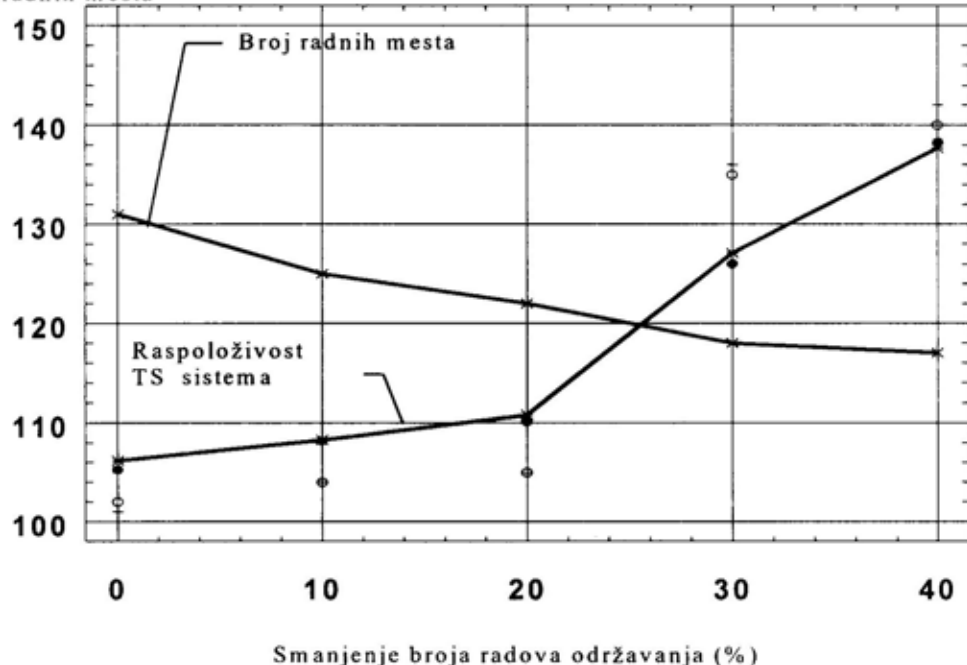
uz primenu koncepta integralne logističke podrške (ILS). Još jedna od mogućnosti smanjenja broja otkaza i preventivnih radnji jeste prenošenje dela poslova na korisnike, odnosno njihovo veće angažovanje na održavanju.

Za ilustraciju efekata koji bi se ostvarili eventualnim smanjenjem broja radova održavanja za 40%, kod prvog SOd, može poslužiti slika 1, na kojoj je prikazana zavisnost između smanjenja broja radova i dve izlazne promenljive: 1) gotovosti – raspoloživosti TS preko srednjeg broja TS u radu i 2) broja potrebnih radnih mesta na srednjem nivou SOd-a [19]. Sa slike se vidi da se raspoloživost, ukoliko se broj radova održavanja smanji za oko 40%, može povećati za oko 30% (odnosno – koliko je manje radnja održavanja toliko je veća gotovost), a broj radnih mesta u održavanju smanjiti i do 10%. Jasno je da se na taj način postiže veće iskorišćenje kapaciteta i smanjenje troškova, odnosno povećava se dobit.

Ediventna je i promena procenta izvršenih radova održavanja, koja raste, posebno na višem nivou sistema za do 5%. Uticaj merodavnih veličina za dimenzionisanje TE, nestacionarnosti i stohastičnosti TZ na zadržavanje iskorišćenja TE na približno nepromenjenom nivou, se manifestovao.

*Promena zakonitosti pojave TZ u vremenu* menja vrednosti pokazatelja raspoloživosti i gubitaka TS u slučaju prvog SOd. Ukoliko se po normalnoj raspodeli vremena između pojava generišu TZ, efekti na raspoloživost su minimalni (2 do 3%) uz, takođe, minimalne gubitke. Kada bi se TZ pojavljivali po eksponencijalnoj raspodeli, trebalo bi očekivati smanjenje pokazatelja raspoloživosti za oko 5 do 7%, ali i gotovo zanemarive gubitke. To se verovatno događa zbog

Broj ispravnih TS i  
radnih mesta



Sl. 1 – Zavisnost između smanjenja broja radova održavanja i izlaznih promenljivih gotovosti – raspoloživosti TS, preko srednjeg broja TS u radu, i broja potrebnih radnih mesta na jednom nivou SOd-a

toga što se, pri generisanju TZ po ovoj raspodeli, više njih pojavljuje za kraće vreme.

*Promena strukture TZ* („težine“ ot-kaza). Sa smanjenjem učešća kategorija radova čije je trajanje do 10 h (aktivnog vremena održavanja) smanjuju se i vrednosti pokazatelja raspoloživosti, u slučaju prvog modelovanog SOd. Situacija postaje krajnje alarmantna kada procenat radova do 10 h padne na 30% od ukupnog broja. Jasno se uočava prelomna tačka na nivou kada radovi do 10 h padnu ispod 60% u strukturi TZ. Posle ove vrednosti pokazatelji raspoloživosti naglo padaju. U organizaciono-tehnološkoj jedinici SOd-a na srednjem nivou evidentan je prirast srednjeg vremena zastoja zbog

održavanja, jer dolazi do nagomilavanja TS. Ni drastičnim povećanjem (za oko 150%) broja TE ne uspeva da se smanji prirast vremena zastoja. U isto vreme, na nižem nivou vremena zastoja ostaju gotovo nepromenjena, što se i moglo očekivati zbog karakteristične raspodele nadležnosti u izvođenju radova održavanja.

Povećanje vremena zastoja zbog održavanja prouzrokuje i drastičan pad procenta izvršenih radova održavanja na srednjem nivou sistema. Ovaj procenat na višem nivou pada, jer se menja količina radova za koju je nadležan taj nivo. Pri svemu tome iskorišćenje TE ostaje gotovo nepromenjeno, što je posledica nestacionarnosti TZ i mera za konačno dimenzionisanje. To ilustruje značaj logi-



stičkih i administrativnih vremena zastoja u projektovanju SOD-a, odnosno potrebu da se što više radova održavanja izvrši neposredno na mestu eksploatacije TS.

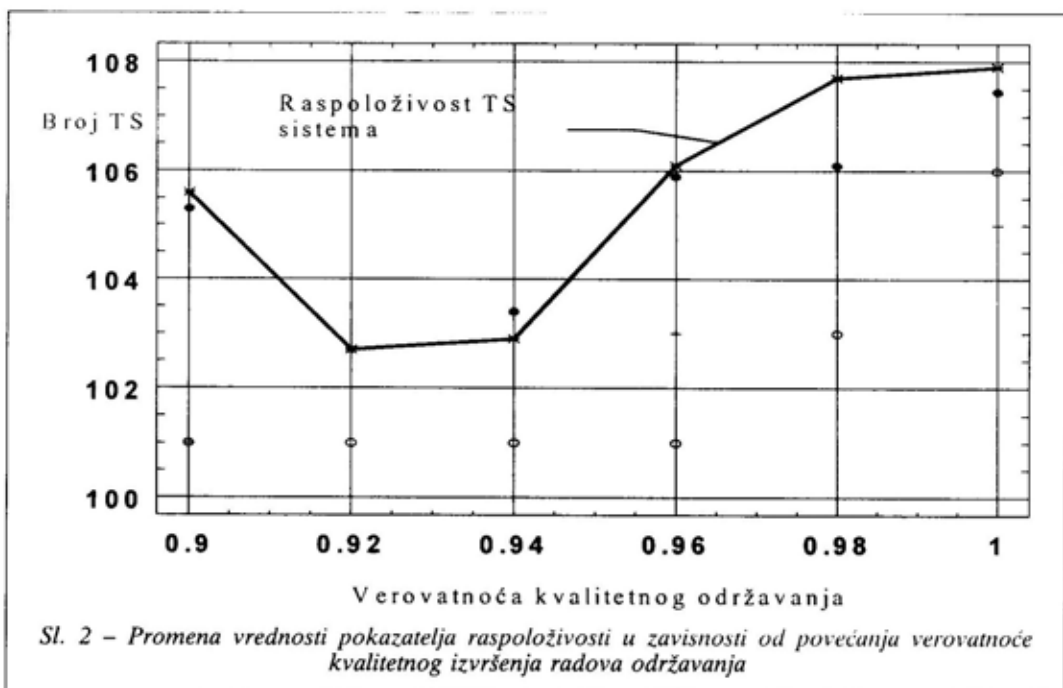
*Povećanje (verovatnoće) kvaliteta izvršenja radova na održavanju, odnosno smanjenje broja reklamacija* ima efekat od oko 2 do 3%, na povećanje vrednosti pokazatelja raspoloživosti, određene preko srednjeg broja TS u radu, u slučaju prvog SOD, što je ilustrovano na slici 2.

Nekih drugih efekata, sem smanjenja vremena zastoja zbog održavanja na srednjem nivou SOD za oko 15%, praktično i nema. Važno je obratiti pažnju na ove rezultate, jer je zadata veličina reklamacija bila svega 10%, odnosno 90% TZ će biti realizovano bez reklamacija (isto na svim nivouima SOD). To znači da je povećanje kvaliteta izvršenja radova na održavanju jedan od boljih puteva povećanja raspoloživosti bez većih troškova.

### *Skraćenje vremena realizacije TZ – aktivnog vremena održavanja*

U slučaju prvog SOD eksperimentirano je sa smanjenjem vremena realizacije TZ za do 50% (linearno za sve radove održavanja), a u slučaju drugog SOD vreme realizacije je povećavano i smanjivano za do 50% (linearno za sve radove održavanja).

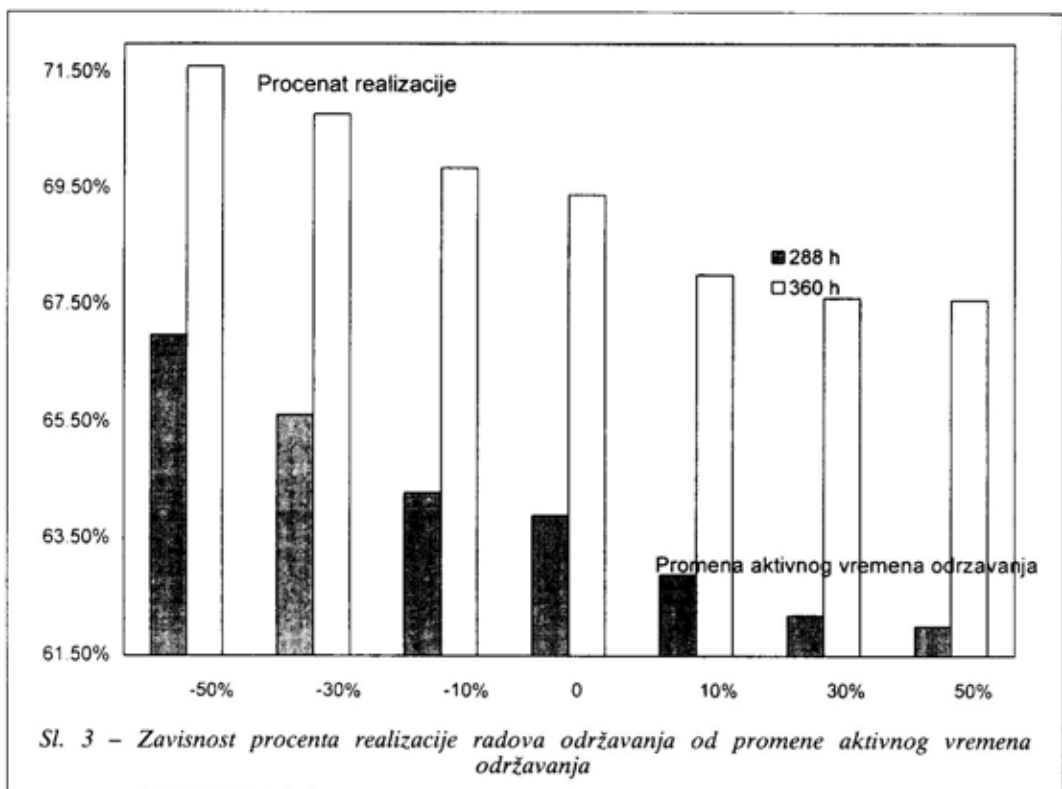
Iz rezultata za prvi SOD vidi se povećanje vrednosti parametara raspoloživosti u odnosu na početno stanje za do 5%. Broj radnih mesta na višem nivou ostaje nepromenjen, ali se zato na srednjem nivou održavanja smanjuje do 25%. Razlog tome treba potražiti u stohastičnosti i nestacionarnosti nastanka TZ, uticaju merodavnih veličina za dimenzionisanje, ali i u uticaju vremena transporta koje nije menjano. Zbog toga promena potrebnog broja TE ne prati promenu skraćenja vremena realizacije TZ za poznatu



tehnologiju na nižem nivou. U ovom slučaju, procenat izvršenja radnji održavanja po nivoima raste – na višem za 15%, a na srednjem nivou za oko 3%. Uticaj merodavnih veličina za dimenzionisanje TE, nestacionarnosti i stohastičnosti TZ ogleda se i u zadržavanju iskorišćenja TE na približno nepromenjenom nivou. Očito je da samo smanjenje vremena realizacije uvođenjem novih ili atipičnih tehnologija neće dati dovoljno dobre efekte ukoliko ne bude praćeno skraćanjem logističkih vremena. Interesantno je da se pokazalo da vremena logističkih i administrativnih zastoja i mogućnost da se radi i noću (u pogodno vreme) presudno utiču na vreme zastoja zbog održavanja, sigurno više od aktivnog vremena održavanja, jer ukupno vreme zastoja i pored smanjenja aktivnog vremena od-

ržavanja za 50% opadne svega 2%. Identične su promene ovih pokazatelja na svim nivoima održavanja. Skraćenje vremena potrebnog za dijagnostiku, u okviru aktivnog vremena održavanja, nije dalo gotovo nikakve efekte na parametre izvršenja i uspešnosti funkcionisanja i to u slučaju skraćanja vremena dijagnostike za do 50%. Razlog ovakvom malom efektu jeste u tome što razmatrana TS spadaju u grupu mašinskih sredstava, za koja vreme dijagnostike predstavlja samo mali deo ukupnog aktivnog vremena održavanja (oko 10%).

U slučaju drugog modelovanog SOD uticaj smanjenja i povećanja aktivnog vremena održavanja je još manji. Pri smanjenju aktivnog vremena održavanja za do 50% gotovost (merena preko procenta ispravnih TS u odnosu na ukupan



broj, mereno u 288. i 360. simulacionom satu) raste za svega do 0,2%. Pri povećanju za oko 50% gotovost pada za do 0,5%. Razlog tome treba tražiti u razlikama u broju i karakteru TS koja se održavaju. U prvom slučaju se radi o malom broju veoma složenih TS čija su vremena održavanja duža. U drugom slučaju TS su veoma raznovrsna, razlike u vremenima održavanja su velike (i do 20 puta), a manje složenih sredstava je daleko više od složenih, pa tako aktivna vremena održavanja imaju manje značajnu ulogu. Uticaj ovog faktora na procenat od izvršenih zahtevanih radova održavanja (TZ), mereno u 288. i 360. simulacionom satu, pokazuje gotovo linearnu zavisnost što se može videti na slici 3. Povećanje procenta izvršenih radova, pri smanjenju aktivnog vremena održavanja za 50%, iznosi za oko 2 do 3%, a za smanjenje za 50% oko 2 do 3% (smanjenje broja izvršenih radova), ukupno na nivou razmatranog SOD.

### *Povećanje tačnosti dijagnostike*

Ovim eksperimentom želi se istražiti koliko na funkcionisanje SOD-a utiču (indirektno mereni na ovaj način): dijagnostička oprema i postupci; obučenos izvršilaca održavanja; sistem kvaliteta u SOD; postojanje kapaciteta za održavanje na najnižem nivou sistema, jer oni mogu dijagnostikovati otkaz.

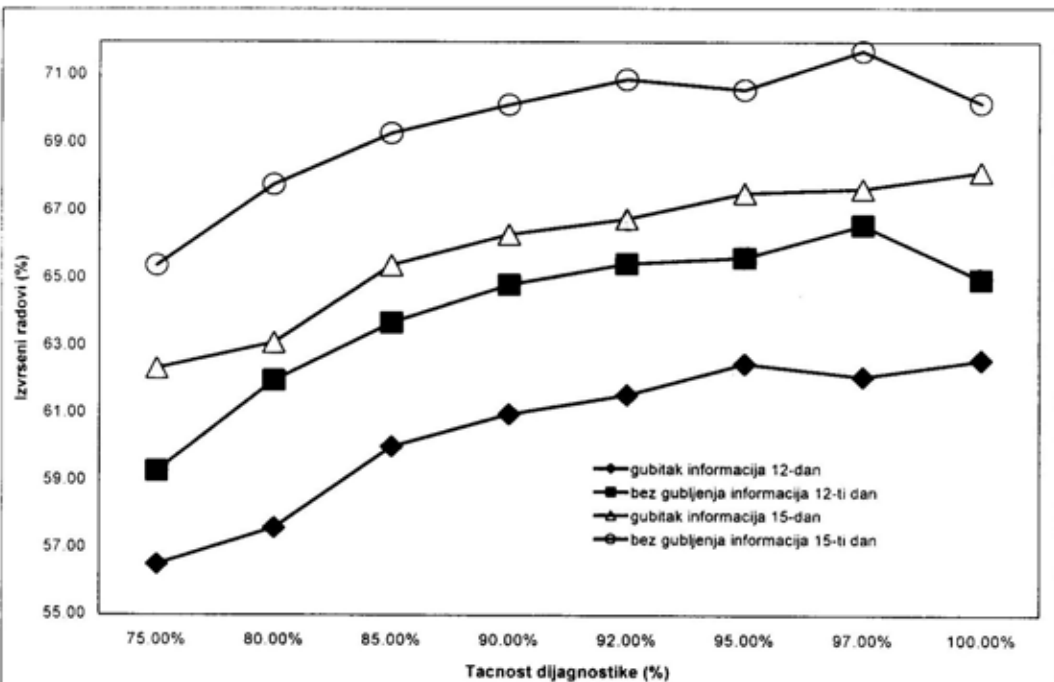
Ovaj faktor ima najveći efekat na ponašanje prvog izučavanog SOD-a. Promena pokazatelja raspoloživosti na nižem nivou je za 5 do 9%, a na nivou tog posmatranog sistema i do 15%. To je posebno važno kada se ima u vidu činjenica da je zadata verovatnoća greške dijagnostike svega 10%. Očito je da brže rastu pokazatelji raspoloživosti za celinu

sistema nego za niže nivoe, jer je to siguran način da se izbegne nepotrebno cirkulisanje TS i r/d između nivoa održavanja. Time se smanjuju gubici na vremenu transporta, logističkim i administrativnim vremenima. Uočava se da je promena broja potrebnih TE na srednjem nivou održavanja gotovo neznatna.

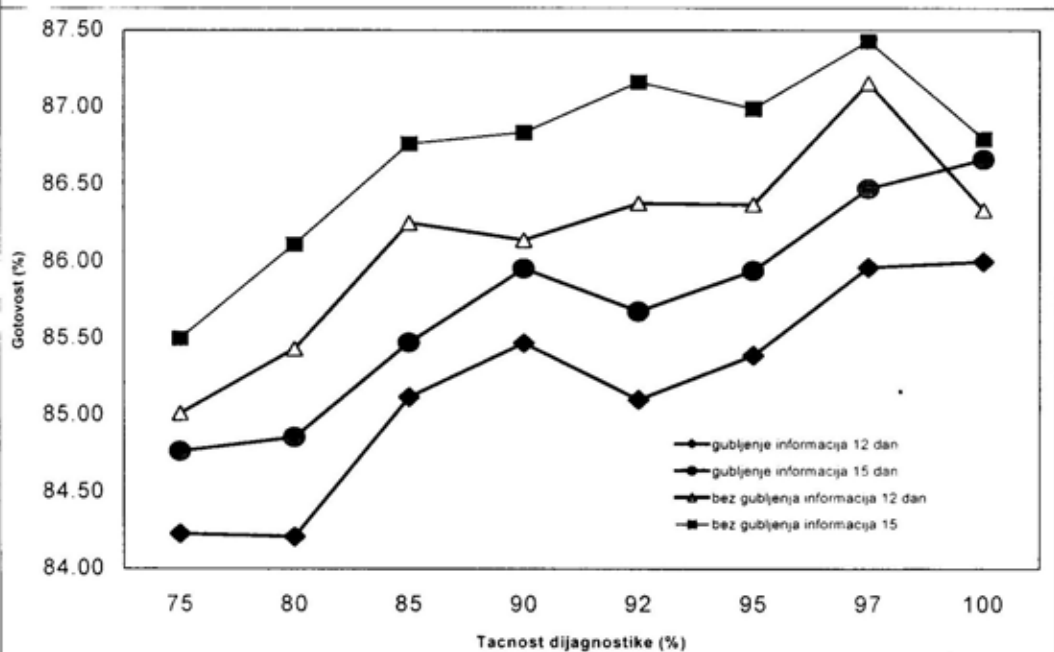
Promena procenta izvršenih radova održavanja je zbog toga veoma značajna. Ona se menja na svim posmatranim nivoima SOD-a, od 5% na nižim nivoima do 10% na višim. Promene iskorišćenja TE praktično nema, a nema ni značajnih promena ostalih posmatranih parametara. Neznatna je i promena srednjeg vremena zastoja zbog održavanja, što govori da tačnost dijagnostike ne utiče na vreme zastoja zbog održavanja, već na otklanjanje nepotrebno multipliciranja radnji.

U slučaju drugog SOD uzet je nešto širi raspon variranja ulazne veličine, odnosno verovatnoća tačnosti dijagnostike se menja na sledeći način: 75%; 80%; 85%; 90%; 92%; 95%; 97% i 100%. Rezultati ovih eksperimenata prikazani su na slikama 4 i 5. Može se zaključiti da izlazni rezultati bitno reaguju na promenu ovog faktora. Za promenu tačnosti dijagnostike od 25% gotovost se povećava za 2 do 3%, a procenat izvršenih radova za 4 do 6% za celinu sistema, dok na gubitke ovaj faktor gotovo da ne utiče. Sa grafikona je jasno da bi poželjna vrednost ovog parametra-faktora bila 90 do 92%, jer se posle te veličine dalja ulaganja u povećanje tačnosti dijagnostike ne isplata.

Razlike između dva posmatrana SOD-a javljaju se zbog karaktera TS koja se održavaju. Ukoliko je potrebno više vremena za održavanje TS, odnosno TS je složenije, tačnost dijagnostike ima veći značaj.



Sl. 4 – Zavisnost gotovosti od tačnosti dijagnostike za slučaj gubljenja i bez gubljenja informacija, posmatrano u 288. i 360. simulacionom satu



Sl. 5 – Zavisnost procenta izvršenih radova od tačnosti dijagnostike za slučaj gubljenja i bez gubljenja informacija, posmatrano u 288. i 360. simulacionom satu

Na prethodnim slikama prikazan je i *uticaj mogućnosti gubljenja – zaturanja informacija*. Ovde su dati rezultati za jednu varijantu organizacione strukture. Kao što se vidi sa slika, slična je zavisnost u slučajevima kada se gube ili ne gube informacije. Praktično, što je veće zaturanje i gubljenje ili neke druge deformacije informacija to je gotovost, odnosno procenat izvršenih radova održavanja manji. Ovde treba imati u vidu da organizacione-upravljačke strukture sa više nivoa, više posrednika u prenosu i obradi informacija i složenijim procedurama obrade i odlučivanja imaju, same po sebi, veću verovatnoću da se zature, zagube i deformišu informacije i suprotno.

*Vreme prenosa i obrade informacija* (administrativno vreme zastoja). Sa ovim uticajnim faktorom direktno je eksperimentisano na modelu drugog SOd. Ovaj model je bio pogodniji, jer je, pored ostalog, direktno bio namenjen izboru najbolje od mogućih organizacionih struktura realnog SOd. U prvom koraku eksperiment je sproveden smanjivanjem i povećavanjem vremena za obradu i odlučivanje, linearno na svim nivoima i mestima u upravljačkoj strukturi za do 50%. Ovde se javila veoma interesantna pojava.

Smanjivanje vremena nije dovelo gotovo do nikakvog povećanja gotovosti niti procenta izvršenih radova. Međutim, povećanje vremena dovelo je do pojave tendencije naglog pada vrednosti ovih pokazatelja (oblici krivih zavisnosti su gotovo identični i za gotovost i za procenat izvršenih radova), što je dovelo do nastavka eksperimenta koji se sastojao u povećanju navedenih vremena, na isti način, do 150%. Oblik istraživane zavisnosti za gotovost prikazan je na slici 6. Povećanje vremena prenosa i obrade in-

formacija za do 150% dovodi do pada gotovosti (mereno u 288. i 360. simulacijom satu) za 3 do 3,5%, a procenta izvršenih radova za do 15%. Iz iznetog proističe da je to izuzetno važan faktor u kreiranju SOd.

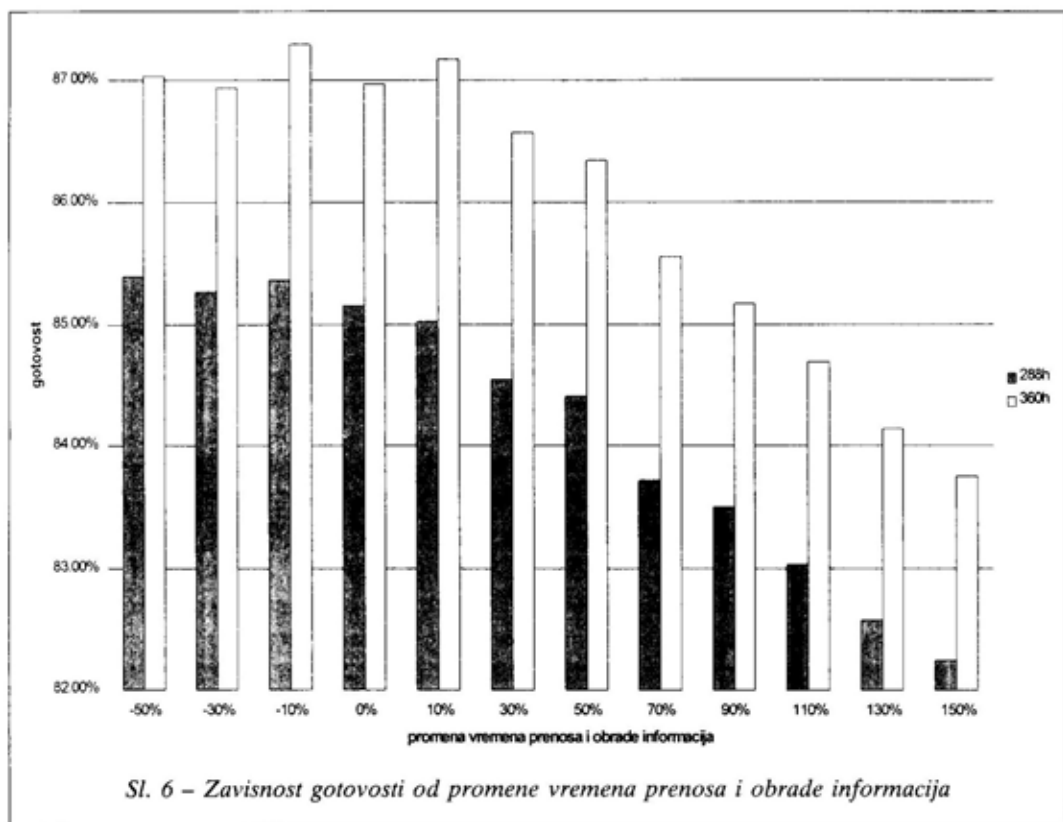
Rezultati bi se mogli tumačiti na sledeći način:

– pošto je 0% (slika 6) praktično pokazatelj gotovosti za najbolju varijantu upravljačko-organizacione strukture, koja je dobijena reprojekovanjem postojeće strukture i kombinacijom najuspešnijih rešenja od više predloženih varijantnih rešenja, dolazi se do zaključka da postoji neka „tačka zasićenja“ posle koje sva dalja usavršavanja upravljačke strukture i ubrzavanje prenosa i obrade informacija neće dati rezultate na poboljšanju opšteg funkcionisanja sistema. Posle ove „tačke“ neće se povećati rezultati ni ubrzavanjem proceduralne brzine prenosa i obrade informacija već se mora ići na ubrzavanje materijalnih i drugih tokova;

– povećanje vremena prenosa i obrade informacija je, praktično, ekvivalent sa organizacionim strukturama koje sadrže mnogo posrednika, štabski način odlučivanja, duge i komplikovane procedure donošenja odluka i zastarelu tehnologiju obrade i prenosa informacija. To se može tvrditi, jer su prethodni eksperimenti u [20] sa „lošijim“ tipovima strukture davali slične rezultate.

Kod prvog SOd nije vršen sličan eksperiment, ali su i tamo „lošije“ strukture davale slične rezultate u odnosu na „bolje“.

Eksperiment sa *brojem nivoa održavanja* povezan je sa eksperimentima sa *količinom resursa* za održavanje i *stepenom autonomije* po nivoima SOd. Eksperiment sa količinom resursa i stepenom autonomije identičan je sa istraživanjem



Sl. 6 – Zavisnost gotovosti od promene vremena prenosa i obrade informacija

uticaja broja i strukture radne snage i verovatnoće zadovoljenja tražnje za r/d bez čekanja.

Ovako je učinjeno zbog toga što se prema kreiranom modelu drugog SOD stepen autonomije, koji se iskazuje kroz verovatnoću da će dati nivo održavanja izvršiti radnju održavanja za koju je nadležan, praktično može poistovetiti sa veličinom potrebnih resursa za održavanje na datom nivou sistema. Na primer, ukoliko je stepen autonomije nekog nivoa 0 onda tog nivoa nema, a ako je 0,95 onda treba shvatiti da će 95% od svih zahteva za održavanje za koje je taj nivo nadležan biti izvršeni na tom nivou, odnosno da postoje za to odgovarajući resursi i kapaciteti radne snage, alata, opreme, prostora, itd.

Verovatnoća održavanja na najvišem nivou SOD (generalni remont) zadržana je kao konstanta od 100% u svim slučajevima, zbog toga što svi indikatori govore da ovaj nivo ne ispoljava presudan uticaj na pokazatelje uspešnosti SOD u slučaju konkretnog eksperimentalnog okvira. U početnom stanju autonomija nivoa modularne celine bila je 0,65, višeg i srednjeg nivoa 0,95, dok je verovatnoća zadovoljenja tražnje za r/d, po nivoima, prosečno bila 0,5.

Prvi je bio eksperiment sa mogućnošću gubitka dela kapaciteta za održavanje (ili promenom veličine kapaciteta za održavanje) koji se sastoji od dve celine:

- sa mogućnošću gubitka kapaciteta za održavanje na svim nivoima;
- sa promenom veličine kapaciteta

za održavanje na nivou modularne jedinice podržavanog sistema.

Teži se da se eksperimentom sa mogućnošću gubitka kapaciteta za održavanje na svim nivoima SOd odredi promena veličina pokazatelja uspešnosti SOd u slučaju kada je moguće da dođe do gubitka dela kapaciteta na svim nivoima SOd. To je realna situacija koja može nastupiti prilikom izvođenja borbenih dejstava kod vojnih SOd, ali je realna i u uslovima pojave raznih razloga odliva radne snage ili nepopunjavanja radnih mesta. Ovaj eksperiment je izveden tako što su verovatnoće održavanja (autonomije nivoa održavanja) na svim nivoima linearno menjane, odnosno umanjivane u odnosu na njihovu početnu vrednost, po sledećem: -0% (osnovno stanje); -10%; -20%; -30% i -40%.

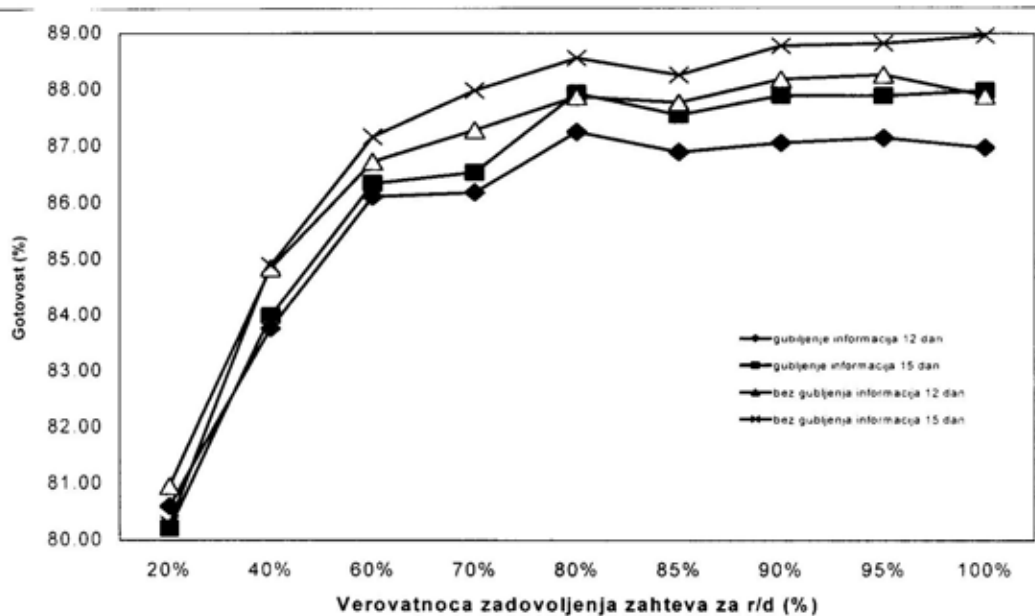
Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da izlazni rezultati manje reaguju na promenu ovog faktora. Za promenu veličine kapaciteta za -40% gotovost pada za do 1%, a procenat izvršenih radova za 3 do 4%, dok na gubitke ovaj faktor gotovo da ne utiče. Sličan je odnos u slučajevima da se gube ili se ne gube informacije.

Eksperiment sa promenom veličine kapaciteta za održavanje na nivou modularne jedinice podržavanog sistema sproveden je sa ciljem da se utvrdi kolika treba da bude verovatnoća održavanja (autonomija) na tom nivou. Veličina ove verovatnoće ima za direktnu posledicu veličinu potrebnih kapaciteta na tom nivou SOd, jer utiče na verovatnoću „na koju se vrši odsecanje“ pri dimenzionisanju konkretnih kapaciteta za održavanje. Ovaj eksperiment izveden je tako što su verovatnoće održavanja na višim nivoima ostale iste, kao kod osnovne varijante, dok je na nivou modularne jedinice ova

verovatnoća varirana po sledećem: 45%; 55%; 65%; 75%; 85% i 95%. Iz dobijenih rezultata može se zaključiti da izlazni rezultati reaguju na promenu ovog faktora. Za promenu veličine kapaciteta za 50% gotovost pada do 55% autonomnosti, a povećava se posle 85%, a procenat izvršenih radova raste za 1 do 4%, dok na gubitke ovaj faktor gotovo da ne utiče. Za ostale pokazatelje sličan je odnos u slučajevima da se gube ili se ne gube informacije. Sa grafikona je jasno da bi poželjna vrednost ovog parametra – faktora bila 55 do 85%, jer se posle te veličine dalja ulaganja u povećanje kapaciteta na ovom nivou SOd ne isplate. Prema procentu izvršenih radova poželjna vrednost ovog parametra – faktora bila bi 75%.

Slični eksperimenti sprovedeni su za ostale nivoe SOd (viši i srednji). Varirana je autonomija posmatranog nivoa od 60% do 100%, dok je autonomija nivoa modularne celine podržavanog sistema bila fiksirana na 75%, najvišeg nivoa SOd na 100%, a verovatnoća zadovoljenja tražnje za  $r/d$  na svim nivoima na 95% (da bi se isključio uticaj veličine zaliha  $r/d$ ), dok su ostale vrednosti bile iste kao početne. U slučaju višeg nivoa održavanja gotovost se promenila za 1%, a procenat izvršenih radova za do 1% kada je autonomija tog nivoa dostigla 100% u odnosu na početno stanje. Kod srednjeg nivoa održavanja gotovost se promenila za do 1,5%, a procenat izvršenih radova za do 2% kada je autonomija tog nivoa dostigla 100% u odnosu na početno stanje.

Kod eksperimenta sa promenom broja nivoa SOd autonomija nivoa koji se isključuje bila je određivana na 0%, kao i verovatnoća zadovoljenja tražnje za  $r/d$  na tom nivou, dok su ostali parametri na drugim nivoima menjani. Pokazalo se



Sl. 7 – Zavisnost gotovosti od verovatnoće zadovoljenja zahteva za r/d bez čekanja

da ukidanje nekog od nivoa (modularne celine, višeg ili srednjeg) utiče na promenu pokazatelja gotovosti svega od 1 do 2%, što je u ovom slučaju minimalna promena. Ovo ukazuje na to da ovakve analize nije moguće izvršiti korektno bez istovremenog sagledavanja uticaja ovakvih odluka na troškove, odnosno bez dimenzionisanja sistema. Ovo poslednje treba sagledati u svetlu činjenica da ukidanje jednog od nivoa SOd istovremeno znači promenu veličine administrativnih i logističkih vremena, kao i da nužno ne vodi smanjenju troškova, posmatrano kroz veličinu potrebnih resursa, jer se radovi održavanja ne gube iz sistema već se samo prelivaju sa nivoa na nivo.

Eksperiment sa promenom verovatnoće trenutnog zadovoljenja zahteva za r/d po nivoima SOd vrši se sa ciljem da se utvrdi kako vrednost ove verovatnoće utiče na osnovne pokazatelje uspešnosti funkcionisanja SOd. Naime, američkim

vojnim standardom MIL-STD-1390A zahteva se da ova verovatnoća na svim nivoima SOd iznosi 95%. Zbog toga je eksperiment organizovan na taj način da verovatnoća trenutnog zadovoljenja zahteva da r/d bude ista na svim nivoima SOd, i da se menja prema vrednostima od 20% do 100% linearno i istovetno po svim nivoima održavanja u slučaju drugog SOd.

Rezultati ovih eksperimenata prikazani su na slici 7. Može se zaključiti da izlazni rezultati reaguju na promenu ovog faktora. Za promenu verovatnoće trenutnog zadovoljenja zahteva za r/d za 80%, gotovost se povećava za do 9%, a procent izvršenih radova za oko 40%, dok na gubitke ovaj faktor gotovo da ne utiče. Sličan je odnos u slučajevima kada se gube ili se ne gube informacije. Sa grafikona je jasno da bi poželjna vrednost ovog parametra-faktora bila 60 do 80%, jer posle te veličine dalja ulaganja u



povećanje zaliha r/d se ne isplate (praktično na osnovu podatka o ovoj verovatnoći moguće je dimenzionisati potrebnu veličinu zaliha r/d). Veoma je važno uočiti da prikazana zavisnost praktično ima dva linearna dela: do verovatnoće od 60 do 80% i posle toga. Ove dve linearne zavisnosti razlikuju se po veličini prirasta za istu promenu nezavisno-promenljive.

Slični rezultati dobijeni su i kod eksperimenta na prvom SOd. I tamo je konstatovan linearni oblik zavisnosti između posmatrane verovatnoće i vrednosti gotovosti. Vrednost pokazatelja gotovosti stabilizuje se oko verovatnoće zadovoljenja potražnje od 0,9 i postaje skoro nepromenljiva. Dostizanjem te vrednosti verovatnoće zadovoljenja potražnje za r/d eliminiše se i mogućnost gubitaka TS.

Interesantno je napomenuti da se ovi rezultati slažu sa nekim podacima iz literature [25] gde se, takođe, kao pogodna vrednost verovatnoće navodi vrednost od 0,70 do 0,85. Iznad tih vrednosti troškovi zaliha naglo rastu.

Značajno je pomenuti i neke sekundarne rezultate do kojih se došlo analizom relevantnih faktora:

- najbolja rešenja SOd u odnosu na početna (trenutna u realnim SOd), prema pokazateljima uspešnosti, i do 30% su bolja, što znači da se reprojekovanjem SOd na osnovu spomenute metodologije [9] mogu postići izuzetno značajni rezultati. U ovom slučaju najveći uticaj na poboljšanje rešenja imalo je skraćivanje ukupnog vremena realizacije tehnoloških zahteva (zastoja zbog održavanja);

- uz bolja organizaciona rešenja, i sa relativno manje efikasnom tehnologijom i manjim brojem TE, mogu se postići veće vrednosti pokazatelja funkcionisanja;

- isturanje kapaciteta za održavanje bliže mestu eksploatacije TS uvek daje pozitivne efekte;

- ešeloniranje r/d na tri nivoa (umesto četiri) dovodi do povećanja gotovosti za 2,1 do 4,1% i realizacije tehnoloških zahteva za 12 do 13%, odnosno daje veoma dobre efekte;

- potrebno je voditi računa o tome da je srednji nivo najopeterećeniji element u SOd;

- nikako ne treba narušavati, organizacionim i drugim preprekama, materijalne i informacione tokove od nastanka zahteva za održavanje do njegovog zadovoljenja. Strukture koje su na ovaj način koncipirane, odnosno one orijentisane prema procesima, uvek su se pokazale kao bolje;

- interesantno je, takođe, zapaziti da varijante SOd sa funkcionalnim organizacionim strukturama spadaju uvek u grupu boljih.

## Zaključna razmatranja

Na osnovu iznetih rezultata može se izvršiti rangiranje razmatranih relevantnih faktora u odnosu na promenu pokazatelja uspešnosti funkcionisanja i mogućnosti primene u odnosu na potrebna ulaganja. Promenama u SOd ovakvim redosledom razvojnih koraka postigli bi se najveći efekti uz najmanja ulaganja. Ovaj redosled je, takođe, logičan, jer npr. bez uvođenja automatske obrade podataka i informacionog sistema nema efikasnog i efektivnog upravljanja zalihama r/d.

1. Može se tvrditi da je koncepcija – strategija održavanja ključni faktor uticaja na efektivnost i efikasnost sistema održavanja. Ovaj zaključak je i logički jasan, jer će opredeljenje za strategiju održavanja uticati na karakter, obim i učestanost radova održavanja koje treba izvršiti u konkretnom sistemu. Šire shvaćeno ovde treba uključiti i primenu koncepcije ILS.

2. Od pojedinačnih faktora najveću pažnju treba obratiti na skraćivanje administrativnih vremena kroz izmene u tipu i obliku upravljačke-organizacione strukture i primenu savremene tehnologije za prenos i obradu informacija.

3. Naredni faktor jeste skraćivanje logističkih vremena, posebno kroz određivanje optimalnog nivoa, načina upravljanja i rasporeda zaliha r/d po nivoima i ubrzavanje za njih vezanih materijalnih i informacionih tokova.

4. Povećanje kvaliteta izvršenja radova održavanja više zahteva promene u ponašanju ljudi i organizaciji nego materijalna ulaganja.

5. Uvođenje i primena savremene dijagnostičke opreme svakako je i jedan od najznačajnijih svetskih trendova.

6. Uvođenje savremene remontne opreme.

7. Interesantno je da rezultati pokazuju da, ukoliko u sistemu nedostaju neki resursi, ne treba žuriti sa njihovom nabavkom – popunom, jer je njihov uticaj na uspešnost funkcionisanja mali. Time se mogu postići određene uštede na kraći period, ali treba imati u vidu da ovakvo stanje ne može potrajati u nedogled, jer će doći do nagomilavanja nedovršenih poslova do kritičnih razmera. Ovi rezultati ukazuju na potrebu za što tačnijim dimenzionisanjem izvršnih i upravnih elemenata SOd, jer je vrlo teško menjati broj ljudi, radnih mesta i druge opreme zbog toga što se dugo pribavljaju i uvode u rad, već je potrebno postojeće bolje iskoristiti.

Primena promena u SOd ovim redosledom imala bi veći efekat na sistem, jer bi se uvećavao sinergijski efekat. Usavršavanja se mogu izvršiti i kombinacijom nekih navedenih koraka. Ovakav redosled logičan je i za jednu i drugu navedenu grupu SOd, s tim što su prva dva koraka sigurno mnogo značajnija za prvu grupu, posebno „velikih“ SOd.

#### Literatura:

- [1] Salvendy, G.: Handbook of Industrial Engineering, A. Wiley-Interscience Publication, 1982.
- [2] Wolkswagen, Priručnik Servisne organizacije, Export izdanje, 1998.
- [3] Killbrew, R.: Learning from War Games: a Status Report, Parameters, US Army War College Quarterly, pp. 122-135, 1998.
- [4] Naim, M. M., Lewis, J.C.: Benchmarking of aftermarket supply chains, Production planning & control, vol. 6., No. 3., 258-269, 1996.
- [5] Davenport, T. H., Process Innovation: Re-engineering Work Through Information Technology (Harvard Business School Press), 1993.
- [6] Harrington, H. J.: Business Process Improvement, The Breakthrough Strategy for Total Quality, Productivity and Competitiveness, McGraw-Hill, New York, 1991.
- [7] Evans, G. N., Towill, D. R., Naim, M. M.: Business process re-engineering the supply chain, Production planning & control, vol. 6., No. 3., 227-237, 1995.
- [8] Hammer, M., and Champy, J.: Re-engineering The Corporation: A Manifesto for Business Revolution, Nicholas Brealey publishing, London, 1993.
- [9] Petar Stanojević, Vasilije Mišković, Vladimir Bukvić: Maintenance Systems Organizational Structure Designing Methodology based on Modeling and Simulation, ESM'2000, Simulation Congress, Ghent, 2000.
- [10] Woodward, J.: Industrial Organisation – Theory and Practice, Oxford University Press, Amen House, London E.C.4., 1965.
- [11] Burlat, P., Campagne, J. P., Neubert, G.: Modeling organizational structure; a new challenge for simulation, EURO-SIM '98, Simulation Congress, Helsinki, 1998.
- [12] Crostach, H. A., Becker M., Sall, M.: Process Networks engineering: controlloop-based modeling of decentralized factories, EUROSIM '98, Simulation Congress, Helsinki, 1998.
- [13] Adamović, Ž.: Logistički sistem održavanja, Privredni pregled, Beograd, 1989.
- [14] Adamović, Ž.: Upravljanje održavanjem tehničkih sistema, OMO, Beograd, 1986.
- [15] Maslov, N. N.: Organizacija kapitaljnog remonta avtomobila, Tehnika, Kijev, 1977.
- [16] Jevtić, M.: Održavanje alatnih mašina, Beograd, 1984.
- [17] Električeskie stanicii, Energoatomizdat br. 5, Moskva 1994.
- [18] Grothus H.: Planiranje troškova održavanja, OMO, Beograd, 1977.
- [19] Stanojević P.: Uticaj tehničkih faktora na organizacionu strukturu sistema održavanja, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1997.
- [20] Grupa autora: Projekat: Primena logističkog pristupa u organizovanju Vojске Jugoslavije, projektni materijali, Beograd, 1998-2000.
- [21] Larman, C.: Applying UML and Patterns, Prentice Hall PTR, 1998.
- [22] Vukićević, S.: Skladišta, Preving, Beograd, 1995.
- [23] Mintzberg, H.: The Structuring of Organizations. A Synthesis of the Research, New York, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, 1979.
- [24] Conger, S.: The New Software Engineering, Woodworth Publishing Company, International Tomson Publishing, 1994.
- [25] Kodžopeljić J. i dr.: Osnove Integralne logističke podrške tehničkih sredstava i sistema, JUSK, Beograd, 1989.

*Rezime:*

*Singularni sistemi predstavljani su u matematičkom smislu kombinacijom diferencijalnih i algebarskih jednačina, pri čemu ove druge predstavljaju ograničenje koje opšte rešenje mora da zadovolji u svakom trenutku. Primera singularnih sistema ima skoro u svim granama nauke i tehnike. Javljaju se često u elektro-magnetnim kolima, dinamici robota i savremenih letelica, optimizacionim problemima i kao granični slučaj singularno-perturbovanih sistema. Osnovna dinamička analiza ove klase sistema u vremenskom domenu podrazumeva ispitivanje stabilnosti kako sa pozicija Ljapunova tako i sa pozicija stabilnosti na konačnom vremenskom intervalu. Mimo toga od posebne je važnosti i očuvanje ove važne osobine sistema i u prisustvu različitih perturbacija kako bi se i u krajnje nepredvidljivim uslovima obezbedilo kvalitetno ponašanje sistema. Ova složena problematika danas je predmet oblasti upravljanja poznatijom pod nazivom teorija robustnosti.*

*Cljučne reči: linearni sistemi, singularni sistemi, stabilnost u smislu Ljapunova, stabilnost na konačnom vremenskom intervalu, robustnost stabilnosti.*

---

ANALYSIS OF STABILITY ROBUSTNESS FOR LINEAR TIME INVARIANT  
SINGULAR CONTROL SYSTEMS

*Summary:*

*Singular systems are those the dynamics of which is governed by a mixture of algebraic and differential equations. In that sense the algebraic equations represent the constraints to the solution of the differential part. These systems are also known as descriptor, semi-state and generalized systems. They appear as a linear approximation of systems models, or linear system models in many applications such as electrical networks, aircraft dynamics, neutral delay systems, large-scale systems, interconnected systems, economics, optimization problems, feedback systems, robotics, etc. The basic dynamic analysis in time domain is devoted to the question of stability in the sense of Lyapunov as well as in the sense of finite time stability. Besides that, it is of particular interest to maintain the systems characteristics under the action of undesirable perturbations. This question is in the connection with the problems treated well by the modern concept of stability robustness within the area of control engineering.*

*Key words: linear systems, singular systems, stability in the sense of Lyapunov, finite time stability, robustness.*

---

**Uvod**

Singularni sistemi predstavljaju dinamičke sisteme opisane kombinacijom algebarskih i diferencijalnih jednačina, što ne dozvoljava njihovo predstavljanje u klasičnom obliku vektorske diferencijalne jedna-

čine stanja, a samim tim i onemogućava njihovo rešavanje uobičajenim metodama koje se koriste za rešavanje „normalnih” sistema.

U tom smislu, algebarske jednačine predstavljaju ograničenje nametnuto rešenju odnosno rešavanju dela sistema koji sadrži diferencijalne jednačine.

Kompleksna priroda singularnih sistema prouzrokuje mnoge poteškoće u njihovom analitičkom i numeričkom proučavanju a koje se ne javljaju kada su u pitanju tzv. *normalni sistemi*. U tom smislu od posebne su važnosti pitanja *postojanja i jedinstvenosti rešenja, konzistentnih početnih uslova i impulsnog ponašanja*. Neka od ovih pitanja biće najpre razmotrena, a radi što boljeg razumevanja suštinskih problema koji su predmet izlaganja u ovom radu.

Pregled najnovijih rezultata i iscrpan uvid u do sada publikovane radove može se naći u sledećim referencama: *Bajic (1992), Campbell (1980, 1982), Lewis (1986, 1987), Debeljkovic et al. (1996a, 1996b, 1998) i u dva tematska broja časopisa Circuits*.

Primeri singularnih sistema u tehnici su veoma brojni. U tom smislu od posebnog je interesa rad *Stevens (1984)* koji u dinamici projektila prepoznaje, modelira, simulira i analizira posebnu klasu singularnih sistema, proisteklih iz strukturnih ograničenja razmatranog objekta automatskog upravljanja namenjenog vojnim potrebama.

### Preliminarna razmatranja

Matematički opis ovih sistema u prostoru stanja izgleda ovako:

$$\begin{aligned} E\dot{\mathbf{x}}(t) &= A\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t), & \mathbf{x}(t_0) &= \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{x}_1(t) &= C\mathbf{x}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

gde je matrica  $E$  u nekom smislu obavezno *singularna*,  $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$  vektor stanja,  $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^m$  vektor upravljanja. Konstantne matrice  $A, B, C$  su odgovarajućih dimenzija.

Ako je *matrični par*  $(sE - A)$  *regularan*, tj. ukoliko je:

$$\det(sE - A) \neq 0, \quad s \in \mathcal{L} \quad (2)$$

tada rešenja sistema, datog jed. (1), postoje i *jedinstvena su*, a ukoliko su im pridruženi *konzistentni početni uslovi*, ona su *glatka* (ne sadrže impulse) i mogu se dobiti u zatvorenom obliku.

Rešenje „*normalnog*” sistema jednačina može se odrediti kako u slobodnom tako i u prinudnom radnom režimu, za proizvoljne početne uslove. Zbog singularnog karaktera razmatranog sistema diferencijalnih jednačina, *svi mogući početni uslovi nisu prihvatljivi*. Oni početni uslovi koji su prihvatljivi nazivaju se *konzistentnim*.

Osnovno obeležje *konzistentnih početnih uslova* je da oni generišu *glatka rešenja*, a ako se razmatranom sistemu jednačina pridruže *nekonzistentni uslovi*, javiće se *impulsno ponašanje* na početku njihove integracije.

Skup svih vektora  $\mathbf{x}_0$ , koji obrazuju potprostor konzistentnih početnih uslova, u oznaci  $W_k$ , može se odrediti na osnovu sledećih rezultata.

Osnovno geometrijsko oruđe u karakterizaciji potprostora konzistentnih početnih uslova je sekvenca potprostor, određena sa:

$$W_0 = \mathbf{R}^n, \quad (3)$$

$$W_{j+1} = A^{-1}(EW_j), \quad j \geq 0, \quad (4)$$

gde  $A^{-1}(\cdot)$  predstavlja inverzni lik  $(\cdot)$  pod dejstvom operatora  $A$ .

*Lema 1.* Sekvenca potprostora  $\{W_0, W_1, W_2, \dots\}$  formirana je tako da zadovoljava:

$$W_0 \supset W_1 \supset W_2 \supset W_3 \supset \dots \quad (5)$$

Štaviše, može se napisati:

$$\mathcal{N}(A) \subset W_j, \quad \forall j \geq 0, \quad (6)$$

pri čemu postoji nenegativan ceo broj  $k \geq 0$ , takav da je:

$$W_{k+1} = W_k, \quad (7)$$

tako da važi:

$$W_{k+j} = W_k, \quad \forall j \geq 1. \quad (8)$$

Ako je  $k^*$  najmanji nenegativni ceo broj koji zadovoljava prethodnu jednačinu, tada je:

$$W_k \cap \mathfrak{N}(E) = \{0\}, \quad k \geq k^*, \quad (9)$$

pod uslovom da je  $(\lambda E - A)$  invertibilno, za neko  $\lambda \in \mathbf{R}$  [26].

*Dokaz.* Očigledno je da je  $W_1 \subset W_0$ , pa pretpostavimo da je  $W_j \subset W_{j-1}$ . Uočimo da važi:

$$W_{j+1} = A^{-1}EW_j \subset A^{-1}EW_{j-1} = W_j, \quad (10)$$

pa je time matematičkom indukcijom dokazana jed. (5). U ovim razmatranjima  $E$  i  $A$  su linearni operatori koji preslikavaju prostor  $X$  u višedimenzionalni realni, vektorski prostor  $X^n$ . Dokaz da važi jed. (6) je trivijalan, pošto je  $A^{-1}Y \supset \mathfrak{N}(A)$  za bilo koji linearni vektorski prostor  $Y \subset X = \mathbf{R}^n$ . Postojanje broja  $k$  koji zadovoljava jed. (8) sledi iz strukture niza datog jed. (5), kao i činjenice da je prostor  $X$  konačne dimenzije.

Da bi se dokazalo da važi izraz dat jed. (9), potrebno je samo dokazati da on važi za  $k = k^*$ , pošto je  $W_k = W_{k^*}$ ,  $k \geq k^*$ , zbog jed. (7-8). Izabraće se  $\lambda \in \mathbf{R}$  takvo da je  $(\lambda E - A)$  invertibilno. Neka je:

$$\hat{E} = (\lambda E - A)^{-1}E, \quad \hat{A} = (\lambda E - A)^{-1}A. \quad (11)$$

Uočimo da važi:

$$(\lambda \hat{E} - \hat{A}) = I, \quad (12)$$

te su  $\hat{E}$  i  $\hat{A}$  komutativne, tj.  $\hat{A}\hat{E} = \hat{E}\hat{A}$ .

Usvojimo nesingularnu modalnu matricu  $M$ , tako da je:

$$\hat{E} = M \begin{bmatrix} Q_0 & 0 \\ 0 & N \end{bmatrix} M^{-1}, \quad (13)$$

$$\hat{A} = M \begin{bmatrix} \lambda Q_0 - I & 0 \\ 0 & \lambda N - I \end{bmatrix} M^{-1},$$

gde je  $Q_0$  nesingularna matrica, a  $N$  nilpotentna matrica.

Primitimo da je  $(\lambda N - I)$  nesingularna. Očigledno je  $\mathfrak{N}(E) = \mathfrak{N}(\hat{E})$ , pa je dovoljno pokazati da je:

$$W_{k^*} \cap \mathfrak{N}(\hat{E}) = 0. \quad (14)$$

Pokažimo sada da je:

$$W_{k^*} = \hat{A}^- \hat{E}W_{k^*}. \quad (15)$$

Iz jed. (7-8) sledi da je  $W_{k^*} = A^{-1}EW_{k^*}$ , pa sledi  $AW_{k^*} \subset EW_{k^*}$ . Množenjem sa leve strane sa  $(\lambda E - A)^{-1}$  dobija se  $\hat{A}W_{k^*} \subset \hat{E}W_{k^*}$ , dakle  $W_{k^*} \subset \hat{A}^{-1}\hat{E}W_{k^*}$ . Ako je dalje  $\mathbf{x} \in \hat{A}^{-1}\hat{E}W_{k^*}$ , onda je  $\hat{A}\mathbf{x} = \hat{E}\mathbf{q}$  za neko  $\mathbf{q} \in W_{k^*}$ , odakle imamo  $A\mathbf{x} = E\mathbf{q}$ . Dalje sledi da je  $\mathbf{x} \in A^{-1}EW_{k^*} = W_{k^*}$ , što povlači da je  $\hat{A}^{-1}\hat{E}W_{k^*} \subset W_{k^*}$ , pa je time tvrđenje dato jed. (15) dokazano.

Pretpostavimo da je

$\mathbf{x} \in W_{k^*} \cap \mathfrak{N}(\hat{E})$ . Može se pisati:

$$\hat{A}\mathbf{x} = \hat{E}\mathbf{y}^{(1)}, \quad \mathbf{y}^{(1)} \in W_{k^*}. \quad (16)$$

Jednostavnim izračunavanjem dobija se  $\hat{E}\hat{A}\mathbf{x} = \hat{A}\hat{E}\mathbf{x} = 0 = \hat{E}^2\mathbf{y}^{(1)}$ , tako da je:

$$\hat{A}\mathbf{x} = \hat{E}\mathbf{y}^{(1)}, \quad E^2\mathbf{y}^{(1)} = 0, \quad \mathbf{y}^{(1)} \in W_{k^*}. \quad (17)$$

Dokažimo sada indukcijom da, za svaki broj  $j \geq 1$ , postoji  $\mathbf{y}^{(j)}$  takvo da je:

$$\hat{A}^j\mathbf{x} = \hat{E}^j\mathbf{y}^{(j)}, \quad \hat{E}^{j+1}\mathbf{y}^{(j)} = 0, \quad \mathbf{y}^{(j)} \in W_{k^*}. \quad (18)$$

Tvrđenje dato jed. (18) je tačno za  $j = 1$  usled jed. (17), pa pretpostavimo da je tačno i za  $j$ . Može se pisati:

$$\hat{A}\mathbf{y}^{(j)} = \hat{E}\mathbf{y}^{(j+1)}, \quad \mathbf{y}^{(j+1)} \in W_{k^*}. \quad (19)$$

pa, koristeći jed. (18), sledi:

$$\begin{aligned} \hat{A}^{j+1}\mathbf{x} &= \hat{A}\hat{E}^j\mathbf{y}^{(j)} = \hat{E}^j\hat{A}\mathbf{y}^{(j)} = \\ &= \hat{E}^{j+1}\mathbf{y}^{(j+1)}. \end{aligned} \quad (20)$$

Uočimo da je:

$$\mathbf{0} = \hat{A}^{j+1}\hat{E}\mathbf{x} = \hat{E}\hat{A}^{j+1}\mathbf{x} = \hat{E}^{j+2}\mathbf{y}^{(j+1)}, \quad (21)$$

čime je induktivna hipoteza potvrđena.

Da bismo završili dokaz leme, pretpostavimo da je  $N^\nu = \mathbf{0}$  i usvojimo  $j = \nu$  u jed. (18). Iz matricnih reprezentacija datih jed. (13), sledi da  $\hat{E}^{\nu+1}\mathbf{y}^{(\nu)} = \mathbf{0}$  implicira

$$\hat{E}^\nu\mathbf{y}^{(\nu)} = \mathbf{0}, \text{ pa je zbog toga:}$$

$$\hat{A}^\nu\mathbf{x} = \mathbf{0}, \hat{E}\mathbf{x} = \mathbf{0}. \quad (22)$$

Kako su  $Q_0$  i  $(\lambda N - I)$  nesingularne, jedino moguće rešenje je  $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ , što potvrđuje uslov jed. (14), a time i jed. (9), što se i tražilo.

*Teorema 1.* Pod uslovima Leme 1,  $\mathbf{x}_0$  je konzistentni početni uslov za sistem u slobodnom radnom režimu, dat jed. (1), ako i samo ako je  $\mathbf{x}_0 \in W_{k^*}$ . Štaviše,  $\mathbf{x}_0$  generiše jedinstveno rešenje  $\mathbf{x}(t) \in W_{k^*}$ ,  $t \geq 0$ .

*Dokaz. Neophodnost:* ako rešenje postoji, ono je jedinstveno ukoliko je  $(\lambda E - A)$  invertibilno za neko  $\lambda \in \mathbf{R}$ . Pretpostavimo da  $\mathbf{x}_0$  generiše glatko rešenje  $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{X}$ , pa tada  $E\mathbf{x}^{(1)} = A\mathbf{x}$  povlači da je:

$$\mathbf{x}_0 \in W_1, \mathbf{x}^{(1)}(0) \in W_0. \quad (23)$$

Pokazaće se da je za svako  $p \geq 0$ ,

$$\mathbf{x}^{(j)}(0) \in W_{p-j}, 0 \leq j \leq p. \quad (24)$$

Ovo je očigledno tačno za  $p = 0, 1$ , tako da se tvrđenje dato jed. (24) dokazuje indukcijom. Pretpostavimo da jed. (24) važi za neko  $p \geq 0$ . Uočimo da važi  $E\mathbf{x}^{(p+1)} = A\mathbf{x}^{(p)}$ , pa je zbog toga:

$$\mathbf{x}^{(p+1)}(0) \in W_0, \mathbf{x}^{(p)}(0) \in W_1 \cap W_0 = W_1. \quad (25)$$

Pošto važi i  $E\mathbf{x}^{(p)} = A\mathbf{x}^{(p-1)}$  ima se da je:

$$\mathbf{x}^{(p+1)} \in W_1 \cap W_2. \quad (26)$$

Slično se pokazuje da je:

$$\mathbf{x}^{(j)}(0) \in W_{p+1-j}, 0 \leq j \leq p+1, \quad (27)$$

i induktivna hipoteza je dokazana. Ono što je ovde bitno je da je  $\mathbf{x}(0) \in W_p$ , za svako  $p \geq 0$ , pa sledi da je  $\mathbf{x}(0) \in W_{k^*}$ , što dokazuje neophodnost.

*Dovoljnost:* pretpostavimo da je  $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \in W_{k^*}$  i uočimo da je  $AW_{k^*} \subset EW_{k^*}$ . Ako je  $\bar{W}$  bazisna matrica za  $W_{k^*}$ , možemo pisati:

$$A\bar{W} = E\bar{W}\Lambda, \quad (28)$$

za neku (jedinstveno definisanu jed. (9)) kvadratnu matricu  $\Lambda$ , dimenzije jednake dimenziji  $W_{k^*}$ . Neka je  $\mathbf{x}_0 = \bar{W}\mathbf{z}_0$  i rešimo jednačinu:

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \Lambda\mathbf{z}(t), \quad \mathbf{z}(0) = \mathbf{z}_0. \quad (29)$$

Vektorska funkcija  $\mathbf{x}(t) = \bar{W}\mathbf{z}(t) \in W_{k^*}$ ,  $t \geq 0$  je realna, analitička i zadovoljava početni uslov  $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ . Ona je jedinstveno rešenje jed. (1), za slobodni radni režim, pošto je:

$$E\dot{\mathbf{x}}(t) - A\mathbf{x}(t) = E\bar{W}\dot{\mathbf{z}}(t) - A\bar{W}\mathbf{z}(t) = \\ = E\bar{W}(\dot{\mathbf{z}}(t) - \Lambda\mathbf{z}(t)) = 0, \quad t \geq 0. \quad (30)$$

Ovim je dokaz teoreme završen.

Potprostor konzistentnih početnih uslova, sistem u slobodnom radnom režimu, može se odrediti prevođenjem polaznog sistema na njegovu *normalnu kanoničku formu*:

$$\dot{\mathbf{x}}_1(t) = A_1 \mathbf{x}_1(t) + A_2 \mathbf{x}_2(t), \quad (31)$$

$$\mathbf{0} = A_3 \mathbf{x}_1(t) + A_4 \mathbf{x}_2(t). \quad (32)$$

Tada algebarski deo sistema u potpunosti definiše taj prostor, odnosno:

$$\mathbf{0} = A_3 \mathbf{x}_{10} + A_4 \mathbf{x}_{20}, \quad (33)$$

ili, u ekvivalentnoj notaciji:

$$W_k = \aleph([A_3 \quad A_4]). \quad (34)$$

### Rekapitulacija osnovnih rezultata

Rezultati vezani za analizu robustnosti stabilnosti pojedinih sistema obično su osnovani na nekim ranije izvedenim rezultatima ili prilazima. Zbog toga će biti izloženi neki od rezultata neophodni za bolje razumevanje osnovnih doprinosa ovoga rada, bez ograničenja na regularnost singularnog sistema. To znači da nije neophodno da uslov dat jed. (2) bude ispunjen.

U prvom delu izlaganja traže se uslovi koji garantuju *osobinu privlačenja* za sva ili samo jedan podskup kretanja singularnog sistema u prostoru stanja, što u osnovi odgovara prilazu koji se neguje u ljapunovskom konceptu stabilnosti. Samim tim biće omogućena i procena „slabog“ domena privlačenja, odnosno skupa početnih stanja sistema koja generišu rešenja sa pomenutom osobinom.

Za ove potrebe posmatra se singularni sistem opisan jed. (31–32), koji je nastao primenom linearne nesingularne matrice transformacije na polazni sistem u slobodnom radnom režimu, dat jed. (1). Samim tim važi:

$$ET = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad AT = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix}, \quad (35)$$

gde je  $\mathbf{x}(t) = [\mathbf{x}_1^T(t) \quad \mathbf{x}_2^T(t)]^T \in \mathbf{R}^n$  dekomponovani vektor stanja pri čemu je

$$\mathbf{x}_1^T(t) \in \mathbf{R}^{n_1}, \quad \mathbf{x}_2^T(t) \in \mathbf{R}^{n_2} \quad \text{pri } n = n_1 + n_2.$$

Matrice  $A_i, i=1,2,\dots,4$ , su odgovarajućih dimenzija. Dalje je:

$$\det(ET) = \det E \det T = 0, \quad (36)$$

pri čemu je  $\det T \neq 0$ .

Uslov regularnosti, dat jed. (2), za sistem u obliku jed. (31–32), transformiše se u:

$$\det(cI - A_1) \det(-A_4 - A_3(cI - A_1)^{-1}A_2) \neq 0 \quad (37)$$

ili:

$$\det A_4 \det((cI - A_1) - A_2 A_4^{-1} A_3) \neq 0, \quad (38)$$

pod uslovom da je matrica  $A_4$  *nesingularna*.

Označimo sa  $\varphi_l$  skup svih vektora konzistentnih početnih uslova singularnog sistema datog jed. (41–42). Sa  $\mathcal{M} \in \mathbf{R}^n$  označimo linearnu višestrukost određenu jed. (33) kao:

$$\mathcal{M} = \{\mathbf{x}(t) \in \mathcal{R}^n : \mathbf{0} = A_3 \mathbf{x}_1(t) + A_4 \mathbf{x}_2(t)\}. \quad (39)$$

Za sistem dat jed. (31–32), u opštem slučaju  $\varphi_l \subseteq \mathcal{M}$ , pa u tom smislu vektor konzistentnih početnih uslova

$$\mathbf{x}_0 = [\mathbf{x}_{10}^T \quad \mathbf{x}_{20}^T]^T \text{ mora da zadovolji } A_3 \mathbf{x}_{10} + P = P^T > 0, P \in \mathbf{R}^{n_1 \times n_1} \quad (43)$$

$A_4 \mathbf{x}_{20} = \mathbf{0}$ , ili u ekvivalentnoj notaciji:

$$\mathbf{x}_0 \in \varphi_l \subseteq \mathcal{M} \equiv \mathcal{N}([A_3 \ A_4]). \quad (40)$$

Međutim, ako se pokaže da je zadovoljen *uslov ranga*, dat jednačinom:

$$\text{rang}[A_3 \ A_4] = \text{rang } A_4, \quad (41)$$

tada je očigledno da je

$\varphi_l = \mathcal{M} = \mathcal{N}([A_3 \ A_4])$  [2] i izračunavanje  $\varphi_l$  ne zahteva nikakva dopunska izračunavanja, sem svodenja singularnog sistema, datog jed. (1), na svoj kanonički oblik dat jed. (31–32), [18, 19].

Pošto je transformacija data jed. (1) nesingularna, konvergentnost rešenja obe jednačine je ekvivalentan problem. Isto važi i za osobinu ograničenosti rešenja ovog sistema.

Definišaće se slab domen privlačenja nultog rešenja  $\mathbf{x}(t) = \mathbf{0}$  jed. (31–32) kao:

$$\mathcal{D} \stackrel{\Delta}{=} \{ \mathbf{x}_0 \in \mathbf{R}, \mathbf{x}_0 \in \mathcal{M}, \exists \mathbf{x}(t, \mathbf{x}_0), \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}(t, \mathbf{x}_0)\| \rightarrow 0 \}. \quad (42)$$

Koristi se termin „slab” zbog toga što rešenja jed. (31–32) *ne moraju biti jedinstvena*, tako da za svako  $\mathbf{x}_0 \in W_k$  mogu postojati rešenja koja ne konvergiraju prema ishodištu. Koristiće se Ljapunovljeva direktna metoda za određivanje procene  $\mathcal{D}_e$  skupa  $\mathcal{D}$  ( $\mathcal{D}_e \subseteq \mathcal{D}$ ) Pri tome se ne zahteva ispunjenje uslova regularnosti.

Za sistem opisan jed. (31–32), kvazi-ljapunovska funkcija može biti izabrana kao:

$$V(\mathbf{x}(t)) = \mathbf{x}_1^T(t) P \mathbf{x}_1(t),$$

Totalni izvod funkcije  $V$  duž rešenja  $\mathbf{x}(t)$  sistema datog jed. (31–32) je:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{x}(t)) &= \dot{\mathbf{x}}_1^T(t) P \mathbf{x}_1(t) + \mathbf{x}_1^T(t) P \dot{\mathbf{x}}_1(t) \\ &= (\mathbf{x}_1^T(t) A_1^T + \mathbf{x}_2^T(t) A_2^T) P \mathbf{x}_1(t) + \\ &\quad + \mathbf{x}_1^T(t) P (A_1 \mathbf{x}_1(t) + A_2 \mathbf{x}_2(t)) \\ &= \mathbf{x}_1^T(t) (A_1^T P + P A_1) \mathbf{x}_1(t) + \\ &\quad + \mathbf{x}_1^T(t) P A_2 \mathbf{x}_2(t) + \mathbf{x}_2^T(t) A_2^T P \mathbf{x}_1(t). \end{aligned} \quad (44)$$

Ako je  $\dot{V}(\mathbf{x}(t))$  negativno određena funkcija, onda za svako  $\mathbf{x}_0 \in \mathcal{M}$ , ima se da  $\|\mathbf{x}_1\| \rightarrow 0$ , kada  $t \rightarrow \infty$ . Da bi

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}_2(t)\| \rightarrow 0, \quad (45)$$

potrebno je uspostaviti odgovarajuću vezu između kovektora  $\mathbf{x}_1(t)$  i  $\mathbf{x}_2(t)$ .

Pretpostavimo da je *uslov ranga*:

$$\text{rang}[A_3 \ A_4] = \text{rang } A_4 = r \leq n_2, \quad (46)$$

*zadovoljen*, što na osnovu ranije izloženog povlači  $\varphi_l = \mathcal{N}([A_3 \ A_4])$ . Posledično, tada postoji matrica  $L$  koja zadovoljava sledeću matricnu jednačinu [28]:

$$0 = A_3 + A_4 L, \quad (47)$$

gde je  $0$  nula matrica iste dimenzije kao i matrica  $A_3$ .

Na osnovu jed. (46) i jed. (47), ukoliko rešenja sistema datog jed. (31–32) *postoje, tada postoje i rešenja*  $\mathbf{x}(t)$  čije su komponente povezane na sledeći način:

$$\mathbf{x}_2(t) = L \mathbf{x}_1(t), \quad \forall t \in \mathbf{R}. \quad (48)$$

Uzimajući u obzir uslov ranga, jed. (46), sledi da je  $\mathcal{N}([L - I_{n_2}]) \subseteq \mathcal{N}([A_3 \ A_4])$ .



Da bi se to pokazalo, usvaja se proizvoljno  $\mathbf{x}^* \in \mathcal{N}([L - I_{n_2}])$ , tj.  $\mathbf{x}_2^* = L\mathbf{x}_1^*$ ,

gde je  $L$  bilo koja matrica koja zadovoljava jed. (47). Množeći sa desne strane jed. (47) vektorom  $\mathbf{x}_1^*$ , uz korišćenje jed. (46), lako se dobija:

$$\begin{aligned} 0 &= A_3 \mathbf{x}_1^*(t) + A_4 L \mathbf{x}_1^*(t) \\ &= A_3 \mathbf{x}_1^*(t) + A_4 \mathbf{x}_2^*(t), \end{aligned} \quad (49)$$

što pokazuje da  $\mathbf{x}^* \in \mathcal{N}([A_3 \ A_4])$ . Prema tome  $\mathcal{N}([L - I_{n_2}]) \subseteq \mathcal{N}([A_3 \ A_4])$ .

Procena slabog domena privlačenja data je sa:

$$\mathcal{D}_e = \{\mathbf{x}(t) \in \mathcal{R}^n : \mathbf{x}(t) \in \mathcal{N}([L - I_{n_2}])\} \subseteq \mathcal{D} \quad (50)$$

Iz jed. (44) i jed. (48) dobija se:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{x}(t)) &= \mathbf{x}_1^T(t) (A_1 + A_2 L)^T P \\ &+ P(A_1 + A_2 L) \mathbf{x}_1(t), \end{aligned} \quad (51)$$

koja je negativno određena funkcija u odnosu na  $\mathbf{x}_1(t)$  ako je:

$$\Omega^T P + P\Omega = -G, \quad \Omega = A_1 + A_2 L, \quad (52)$$

gde je  $G$  realna, simetrična, pozitivno određena matrica. Sada se može izneti rezultat:

*Teorema 2.* Neka je zadovoljen uslov ranga, dat jed. (46). Tada je procena,  $\mathcal{D}_e$ , potencijalnog (slabog) domena privlačenja  $\mathcal{D}$  nultog rešenja datog singularnog sistema određena jed. (50), pod uslovom da je matrica  $L$  bilo koje rešenje jed. (47), a  $\Omega = A_1 + A_2 L$  Hurvicova matrica. Štaviše,  $\mathcal{D}_e$  nije jednočlan skup, tako da postoje rešenja sistema datog jed. (31–32), različita od nultog rešenja, koja teže (konvergiraju) prema ishodištu faznog prostora kada vreme neograničeno raste ( $t \rightarrow \infty$ ).

*Dokaz.* Na osnovu uslova ranga, jednačina (46), sledi da je:

$$\varphi_l = \mathcal{N}([A_3 \ A_4]). \quad (53)$$

Izaberimo sada takvo  $\mathbf{x}_0$  da:

$$\mathbf{x}_0 \in \mathcal{N}([L - I_{n_2}]). \quad (54)$$

Očigledno je da je  $\mathbf{x}_0$  vektor konzi-stentnih početnih uslova u trenutku  $t = t_0$ , s obzirom da je:

$$\mathcal{N}([L - I_{n_2}]) \subseteq \mathcal{N}([A_3 \ A_4]) = \varphi_l. \quad (55)$$

Jasno je sada da rešenja  $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}_0)$  sistema datog jed. (31–32) koja polaze iz tačke  $\mathbf{x}_0$  postoje. Budući da je  $\Omega = A_1 + A_2 L$  Hurvicova matrica, onda, prema poznatim rezultatima Ljapunovljeve matricne teorije, postoji jedinstvena simetrična, pozitivno određena matrica  $P$ , koja zadovoljava jed. (52). Prema tome,  $V(\mathbf{x}(t))$ , definisana jed. (43), pozitivno je određena funkcija u odnosu na  $\mathbf{x}_1(t)$  i njen totalni izvod duž rešenja jed. (31–32) ograničen jed. (43) je negativno određen tako da:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}_1(t)\| \rightarrow 0, \quad (56)$$

sve dok:

$$\mathbf{x}_0 \in \mathcal{N}([L - I_{n_2}]). \quad (57)$$

Jed. (48) obezbeđuje i:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}_2(t)\| &= \lim_{t \rightarrow \infty} \|L\mathbf{x}_1(t)\| \leq \\ &\leq \|L\| \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}_1(t)\| \rightarrow 0. \end{aligned} \quad (58)$$

Pošto  $\mathcal{N}([L - I_{n_2}])$  nije jednočlan skup, tada postoje rešenja sistema datog jed. (31–32) sa početnim vektorom  $\mathbf{x}_0 \neq \mathbf{0} \in \mathcal{R}^n$

koja teže ishodištu faznog prostora kada  $t \rightarrow \infty$ . Prema tome,  $D_e$  ima više od jednog elementa što dokazuje *Teoremu*.

Izneti rezultati omogućavaju da se ispita osobina privlačenja nultog ravnotežnog stanja linearnih kako *regularnih*, tako i *iregularnih singularnih sistema*, pod uslovom da su ispunjeni zahtevi koje nameće jed. (46), a što je od posebne važnosti za kasnija ispitivanja osobine robustnosti razmatranog sistema.

Razmatraju se linearni singularni sistemi u *slobodnom radnom režimu*, opisani svojom vektorskom jednačinom stanja, jed. (1) a definisani na vremenskom intervalu  $\tau = [t_0, t_0 + T]$ , gde veličina  $T$  može da bude pozitivan realan broj, ili simbol  $+\infty$ , tako da se stabilnost na konačnom vremenskom intervalu i praktična stabilnost sledstveno, mogu razmatrati jednovremeno. Jasnno je da  $\tau \in \mathbf{R}$ .

Skupovi od interesa  $S_{(c)}$ , koji se koriste kao granice do kojih dosežu moguće trajektorije sistema su vremenski nepromenljivi. Šta više, za njih se pretpostavlja da su *otvoreni*, *povezani* i *ograničeni*, tako da važi:

$$S_\rho = \{ \mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n : \|\mathbf{x}(t)\|_Q^2 < \rho, \forall \mathbf{x}(t) \in W_k \setminus \{0\} \} \quad (59)$$

ili:

$$S_Q(\rho) = \{ \mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n : \|\mathbf{x}(t)\|_Q^2 < \rho \} \quad (60)$$

ili:

$$S_k(\rho) = \{ \mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n : \|\mathbf{x}_k(t)\|_Q^2 < \rho \}, \quad (61) \\ k = 1, 2,$$

gde je  $Q$  realna, simetrična, pozitivno određena matrica a  $W_k$  potprostor konzistentnih početnih uslova.

Sa  $S_\alpha$  označen je skup svih početnih stanja sistema  $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ , a sa  $S_\beta$  skup svih dozvoljenih stanja sistema na razmatranom vremenskom intervalu, tako da je  $S_\alpha \subset S_\beta$ .

### Definicije stabilnosti

*Definicija 1.* Sistem, dat jed. (1) je *stabilan* na konačnom vremenskom intervalu u odnosu na  $\{ \tau, \alpha, \beta, Q \}$  ako i samo ako postoji  $\mathbf{x}_0 \in W_k$  koji zadovoljava uslov:

$$\|\mathbf{x}_0\|_Q^2 < \alpha, \quad (62)$$

povlači da je:

$$\|\mathbf{x}(t)\|_Q^2 < \beta, \quad \forall t \in \tau, \quad [21, 22] \quad (63)$$

*Definicija 2.* Rešenja sistema, datog jednačinama (31 i 32) su *praktično stabilna* u odnosu na  $\{ \tau, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \beta, I \}$  ako i samo ako postoji  $\mathbf{x}_0 \in \mathcal{N}([A_3 \ A_4])$ , koji zadovoljava uslove:

$$\|\mathbf{x}_{10}\|^2 < \alpha_1, \quad \|\mathbf{x}_{20}\|^2 < \alpha_2, \quad (64)$$

povlači da je:

$$\|\mathbf{x}(t)\| < \beta, \quad \forall t \in \tau, \quad \beta_1 + \beta_2 < \beta, [4] \quad (65)$$

### Glavni rezultati

U teoriji automatskog upravljanja od posebne je važnosti očuvanje određenih osobina sistema i u prisustvu izvesnih perturbacija u modelu sistema koje mogu nastati iz više razloga. Tu se prvenstveno misli na netačnosti prisutne u matematičkom modelu procesa, a proistekle iz nemogućnosti da se isti „savršeno” izmodeliraju, za-

tim usled uticaja spoljašnjih dejstava kojima se značajno menja dinamika sistema, nedovoljno tačnog prikupljanja podataka o merenim veličinama, nepravilnog rada pojedinih komponenti upravljačkog sistema i tome slično.

Dinamičko ponašanje sistema u prisustvu „malih“ perturbacija (odstupanja) razmatra teorija osetljivosti.

Problemom očuvanja određenih osobina sistema u prisustvu velikih perturbacija, kao i njihovom neosetljivošću na te promene, bavi se teorija robustnosti.

Za savremene sisteme automatskog upravljanja, i sisteme uopšte, od posebne je važnosti očuvati osobine stabilnosti, upravljivosti, osmotrivosti, itd. Prema tome, osobinu robustnosti ne treba uvek vezivati za stabilnost, jer je ona interesantna i kada su neke druge osobine sistema u pitanju.

Robustnost, pored svog teorijskog, ima i veliki praktičan značaj. Naime, kod znatnog broja komponenti sistema određene vrednosti njihovih parametara nisu dovoljno tačno poznate, ali se znaju granice u kojima se te vrednosti mogu kretati. Samim tim, od velikog je interesa poznavati i utvrditi u kojoj meri i u kojim granicama se menja dinamičko ponašanje razmatranog sistema, kada nedovoljno tačno procenjeni parametri uzimaju svoje ekstremne vrednosti.

Značajne razlike postoje u primeni koncepta robustnosti na jednostruko prenosne i višestruko prenosne sisteme. O tim problemima, kao i o mogućim merama za kvantifikaciju robustnosti, o domenima u kojima se pomenuti koncept može primenjivati, kao i o nizu drugih, veoma značajnih pitanja, zainteresovani se mogu upoznati iz navedene literature.

Za potrebe proučavanja robustnosti ljarunovske stabilnosti razmatra se linearni singularni sistem opisan izrazom:

$$E\dot{y}(t) = Ay(t) + f_p(y(t)), \quad (66)$$

gde  $f_p(y(t))$  predstavlja vektor perturbacija.

Koristeći linearnu nesingularnu transformaciju, sistem dat jed. (66), može se svesti na oblik:

$$\dot{x}_1(t) = A_1 x_1(t) + A_2 x_2(t) + f_1(x(t)), \quad (67)$$

$$0 = A_3 x_1(t) + A_4 x_2(t) + f_2(x(t)), \quad (68)$$

koji očigledno odgovara normalnoj kano- ničkoj formi, pri čemu je:

$$f_p(y(t)) = f_p(Tx(t)) = f(x(t)) = \begin{bmatrix} f_1(x(t)) \\ f_2(x(t)) \end{bmatrix}. \quad (69)$$

Pored toga, uvodi se i sledeća pretpostavka.

*Pretpostavka 1.* Vektor perturbacija zadovoljava sledeći uslov:

$$f_2(x(t)) \equiv 0, \quad f(x(t)) = \begin{bmatrix} f_1^T(x(t)) & 0^T \end{bmatrix}^T, \quad (70)$$

tako da se može napisati:

$$\begin{aligned} f_1(x(t)) &= f_1 \left( \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \right) = \\ &= f_1 \left( \begin{bmatrix} x_1(t) \\ Lx_1(t) \end{bmatrix} \right) = f_1(x_1(t)), \end{aligned} \quad (71)$$

pod pretpostavkom da je matrica  $L$  bar jedno rešenje jednačine (47).

*Teorema 3.* Neka su *Pretpostavka 1* i jed. (46) zadovoljene. Tada netrivialna rešenja sistema, datog jed. (67–68) teže ishodištu faznog prostora kada  $t \rightarrow +\infty$ , ako je ispunjen uslov:

$$\frac{\|f(x)\|}{\|x\|} \leq \mu_1 \equiv \frac{\sigma_{\min}(G)}{\sigma_{\max}(P)}, \quad (72)$$

gde je  $P$  jedinstvena, realna, simetrična i pozitivno određena matrica, koja predstavlja rešenje sledeće Ljapunovljeve matricne jednačine:

$$(A_1 + A_2 L)^T P + P(A_1 + A_2 L) = -2G, \quad (73)$$

gde je  $G$  proizvoljna realna, simetrična, pozitivno određena matrica, a  $\sigma_{\min}([\cdot])$  i  $\sigma_{\max}([\cdot])$  predstavljaju singularne vrednosti matrice  $[\cdot]$ .

*Dokaz.* Neka

$$V(\mathbf{x}(t)) = \mathbf{x}_1^T(t) P \mathbf{x}(t), \quad (74)$$

bude agregaciona funkcija za dati sistem. Valja zapaziti da  $V(\mathbf{x}_1(t)) > 0$  za  $\forall \mathbf{x}(t) \neq 0$  i  $V(\mathbf{x}_1(t)) \rightarrow \infty$ , kada  $\|\mathbf{x}(t)\| \rightarrow \infty$ . Da bi sistem, dat jed. (67–68), posedovao svojstvo privlačenja nultog ravnotežnog stanja, potrebno je da  $\dot{V}(\mathbf{x}(t)) < 0$ .

Diferencirajući jed. (74) po vremenu, a duž rešenja razmatranog sistema, dobija se:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{x}_1(t)) &= \dot{\mathbf{x}}_1^T(t) P \mathbf{x}_1(t) + \mathbf{x}_1^T(t) P \dot{\mathbf{x}}_1(t) \\ &= \mathbf{x}_1^T(t) \left( (A_1 + A_2 L)^T P + P(A_1 + A_2 L) \right) \mathbf{x}_1(t) \\ &+ 2\mathbf{f}^T(\mathbf{x}_1(t)) P \mathbf{x}_1(t) \\ &= \mathbf{x}_1^T(t) (-2G + 2\mu P) \mathbf{x}_1(t), \end{aligned} \quad (75)$$

s obzirom da je:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_1(t)) < \mu_1 \mathbf{x}_1(t). \quad (76)$$

Prema tome, funkcija  $V(\mathbf{x}_1(t))$  je Ljapunovljeva funkcija za dati sistem. Sistem poseduje osobinu privlačenja ako je zadovoljena sledeća matricna nejednačina:

$$-2G + 2\mu_1 P < 0, \quad (77)$$

što je moguće zadovoljiti ako je:

$$2\mu_1 \sigma_{\max}(P) < 2\sigma_{\min}(G), \quad (78)$$

čime se završava i dokaz ove teoreme.

*Teorema 4.* Pretpostavimo da vektorska funkcija  $\mathbf{f}(\mathbf{x}(t))$  ispunjava uslove date *Pretpostavkom 1* i da je istovremeno zadovoljen i uslov ranga, dat jed. (46). Tada netrivialna rešenja sistema, datog jed. (67–68) teže ishodištu faznog prostora kada  $t \rightarrow +\infty$ , ako je ispunjen uslov:

$$\frac{\|\mathbf{f}(\mathbf{x})\|}{\|\mathbf{x}\|} \leq \mu_2 \equiv \frac{\sigma_{\min}(G^{\frac{1}{2}})}{\sigma_{\max}(G^{-\frac{1}{2}}P)}, \quad (79)$$

gde je  $P$  jedinstvena, realna, simetrična i pozitivno određena matrica, koja predstavlja rešenje sledeće Ljapunovljeve matricne jednačine:

$$(A_1 + A_2 L)^T P + P(A_1 + A_2 L) = -2G, \quad (80)$$

*Dokaz.* Neka:

$$V(\mathbf{x}(t)) = \mathbf{x}_1^T(t) P \mathbf{x}(t), \quad (81)$$

bude agregaciona funkcija za dati sistem. Koristeći istu metodologiju kao u prethodnom slučaju, dobija se:

$$\dot{V}(\mathbf{x}_1) = -2\mathbf{x}_1^T G \mathbf{x}_1 + 2\mathbf{x}_1 P \mathbf{f}_1(\mathbf{x}) \quad (82)$$

Neka je ispunjen uslov, dat jed. (79). Tada je:

$$\sigma_{\max}(G^{-\frac{1}{2}}P) \|\mathbf{f}_1(\mathbf{x})\| \leq \sigma_{\min}(G^{\frac{1}{2}}) \|\mathbf{x}_1\| \quad (83)$$

jer je na osnovu *Pretpostavke 1*:

$$\|\mathbf{f}(\mathbf{x})\| = \|\mathbf{f}_1(\mathbf{x})\| \quad (84)$$

Ako se iskoriste sledeće nejednakosti:

$$\|G^{-\frac{1}{2}}P\mathbf{f}_1z\| \leq \sigma_{\max}(G^{-\frac{1}{2}}P)\|\mathbf{f}_1\| \quad (85)$$

$$\|G^{\frac{1}{2}}\mathbf{x}_1\| \geq \sigma_{\min}(G^{\frac{1}{2}})\|\mathbf{x}_1\| \quad (86)$$

i povežu sa jed. (83), dobija se:

$$\|G^{-\frac{1}{2}}P\mathbf{f}_1\| \leq \|G^{\frac{1}{2}}\mathbf{x}_1\|, \quad (87)$$

odnosno:

$$(G^{-\frac{1}{2}}P\mathbf{f}_1)^T(G^{-\frac{1}{2}}\mathbf{x}_1) \leq (G^{\frac{1}{2}}\mathbf{x}_1)^T(G^{\frac{1}{2}}\mathbf{x}_1) \quad (88)$$

ili:

$$\mathbf{f}_1^T P \mathbf{x}_1 \leq \mathbf{x}_1^T G \mathbf{x}_1, \quad (89)$$

i konačno:

$$-2\mathbf{x}_1^T G \mathbf{x}_1 + 2\mathbf{x}_1^T P \mathbf{f}_1(\mathbf{x}) \leq 0. \quad (90)$$

Na osnovu prethodnog rezultata lako se konstatuje da je funkcija  $V(\mathbf{x}_1)$  pozitivno određena u odnosu na  $\mathbf{x}_1$  a njen totalni izvod duž rešenja sistema je, očigledno negativno određen, tako da se može pisati:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}_1(t, \mathbf{x}_0)\| \rightarrow 0 \quad (91)$$

za  $\mathbf{x}_0 \in \mathcal{N}([L - I_{n_1}])$

Imajući u vidu linearnu zavisnost između kovektora stanja, jed. (48), može se konstatovati:

$$\|\mathbf{x}_2(t, \mathbf{x}_0)\| = \|L\mathbf{x}_1(t, \mathbf{x}_0)\| \leq \|L\| \|\mathbf{x}_1(t, \mathbf{x}_0)\| \quad (92)$$

što dovodi i do sledećeg konačnog zaključka:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}_2(t, \mathbf{x}_0)\| \rightarrow 0 \quad (93)$$

za  $\mathbf{x}_0 \in \mathcal{N}([L - I_{n_2}])$

čime je završen traženi dokaz [23].

Kada je u pitanju stabilnost na konačnom vremenskom intervalu, moguće je dati sledeća dva rezultata.

*Teorema 5.* Sistem dat jed. (16.1) je stabilan na konačnom vremenskom intervalu u odnosu na  $\{\tau, \alpha, \beta, Q\}$ ,  $\alpha < \beta$ , ako su ispunjeni sledeći uslovi:

$$(\Lambda(M) + 2\mu)t < \ln\left(\frac{\beta}{\alpha}\right), \quad (94)$$

$$\|\mathbf{f}_p(\mathbf{y}(t))\| \leq \mu \|E\mathbf{y}(t)\|, \quad \mu = \text{const.}, \quad (95)$$

gde je:

$$\Lambda(M) = \max \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x}^T(t)M\mathbf{x}(t): \mathbf{x}(t) \in W_k \setminus \{\mathbf{0}\}, \\ \mathbf{x}^T(t)E^T P E \mathbf{x}(t) = 1 \end{array} \right\}, \quad (96)$$

a:

$$M = A^T P E + E^T P A. \quad (97)$$

*Dokaz.* Ako se agregaciona funkcija usvoji kao:

$$V(\mathbf{y}(t)) = \mathbf{y}^T(t)E^T P E \mathbf{y}(t), \quad (98)$$

tada ona predstavlja pozitivno određenu kvadratnu formu na  $\{W_k \setminus \{\mathbf{0}\}\}$  ako je matrica  $P = P^T > 0$ .

Diferencirajući  $V(\mathbf{y}(t))$  duž kretanja sistema, datog jed. (66), dobija se:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{y}(t)) &= \mathbf{y}^T(t)(A^T P E + E^T P A)\mathbf{y}(t) \\ &\quad + 2\mathbf{y}^T(t)E^T P \mathbf{f}_p(\mathbf{y}(t)), \end{aligned} \quad (99)$$

odnosno, koristeći jed. (96) i jed. (97), dobija se:

$$\dot{V}(\mathbf{y}(t)) \leq (\Lambda(M) + 2\mu)V(\mathbf{y}(t)). \quad (100)$$

Integraljenjem prethodne nejednačine, dobija se:

$$V(\mathbf{y}(t)) \leq V(\mathbf{y}_0)e^{(\Lambda(M)+2\mu)t}, \quad (101)$$

a koristeći činjenicu da je  $\|\mathbf{y}_0\|_Q^2 < \alpha$  i jed. (94), nije teško pokazati da važi:

$$\mathbf{y}^T(t)Q\mathbf{y}(t) = \mathbf{y}^T E^T P E \mathbf{y}(t) = \|\mathbf{y}(t)\|_Q^2 < \beta, \quad (102)$$

što je i trebalo pokazati.

*Teorema 6.* Neka su *Pretpostavka 1* i jed. (46) zadovoljene. Tada su netrivialna rešenja sistema, datog jed. (67–68), stabilna na konačnom vremenskom intervalu u odnosu na  $\{\tau, \alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \alpha \leq \beta_1\}$ , ako su ispunjeni sledeći uslovi:

$$2(\Lambda(A_s) + \mu)t \leq \ln \frac{\beta_1}{\alpha}, \quad (103)$$

$$\|L\|^2 \leq \frac{\beta_2}{\beta_1}, \quad (104)$$

$$\|\mathbf{f}_{p1}(\mathbf{x}_1(t))\| \leq \mu \|\mathbf{x}_1(t)\|, \quad (105)$$

gde je matrica  $A_s$  definisana sa:

$$A_s = \frac{1}{2} \left( (A_1 + A_2 L)^T + (A_1 + A_2 L) \right) \quad (106)$$

*Dokaz.* Dokaz se zbog svoje preobimnosti izostavlja a u celosti se može naći u *Debeljković et al. (1986b)*.

Za dalja razmatranja robustnosti, od interesa je opis linearnog singularnog sistema u obliku:

$$E\dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + \mathbf{f}_p(t, \mathbf{x}(t)), \quad (107)$$

gde matrice  $E$  i  $A$  zadovoljavaju neki od dovoljnih uslova koji obezbeđuju *stabilnost na konačnom vremenskom intervalu*. Nelinearna, nestacionarna funkcija predstavlja najopštiji oblik perturbacija koje deluju na sistem, a uključuje i netačnost modeliranja, tako da se eksplicitan izraz za  $\mathbf{f}_p[(\cdot)]^\dagger$  ne može dati. Zbog toga je realno pretpostaviti da su bar poznate neke moguće granice vektora perturbacija i njihovo određivanje predstavlja osnovni zadatak ovog odeljka, i to tako da nominalni sistem zadrži zahtevane osobine stabilnosti.

U posebnom slučaju, sistem, dat jed. (92), može se predstaviti u sledećoj formi:

$$E\dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + F\mathbf{x}(t), \quad (108)$$

gde  $E, A, F \in \mathbf{R}^{n \times n}$ , a  $F\mathbf{x}(t)$  predstavlja perturbacioni vektor.

Koristeći linearnu, nesingularnu transformaciju sistem, dat jed. (108), može se prevesti u svoju normalnu kanoničku formu:

$$\dot{\mathbf{x}}_1(t) = A_1\mathbf{x}_1(t) + A_2\mathbf{x}_2(t) + F_1\mathbf{x}_1(t) + F_2\mathbf{x}_2(t), \quad (109)$$

$$\mathbf{0} = A_3\mathbf{x}_1(t) + A_4\mathbf{x}_2(t), \quad (110)$$

gde  $\mathbf{x}(t) = [\mathbf{x}_1^T(t) \ \mathbf{x}_2^T(t)]^T$  ne mora obavetno da predstavlja stvarni vektor stanja sistema. U ovom slučaju vektori  $F_1\mathbf{x}_1(t)$  i  $F_2\mathbf{x}_2(t)$  predstavljaju perturbacije modela. Matrice  $F_1$  i  $F_2$  ne moraju biti poznate u potpunosti, a za ova razmatranja je dovoljno

$$\mathbf{f}_p(t, \mathbf{0}) = \mathbf{0}, \quad \forall t.$$

no poznavati granice njihovih normi. Da bi se pojednostavila naredna izlaganja, usvaja se sledeća pretpostavka.

*Pretpostavka 2.* Neka matrica  $L$  zadovoljava jed. (47) i neka  $\varepsilon_i, i = 1, 2, 3$  budu takvi pozitivni brojevi da:

$$\|F_1\| \leq \varepsilon_1, \|F_2\| \leq \varepsilon_2, \|L\| \leq \varepsilon_3. \quad (111)$$

Neka sa  $H$  bude definisana matrica:

$$H = (A_1 + A_2L)^T P + P(A_1 + A_2L) + \varepsilon I_n \quad (112)$$

gde:

$$\varepsilon = 2\Lambda(P)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2\varepsilon_3). \quad (113)$$

Sada je moguće izložiti sledeće rezultate.

*Teorema 7.* Neka su *Pretpostavka 2* i jed. (46) zadovoljene i neka je matrica  $Q$  definisana na sledeći način:

$$Q = \text{diag} \left[ P \quad 0_{n_2} \right] \quad (114)$$

koja je realna, simetrična i pozitivno određena. Tada postoje  $\{\tau, \alpha, \beta, Q\}$  – *praktično stabilna* rešenja sistema, datog jed. (109–110), koja zadovoljavaju jed. (45), ako je ispunjen sledeći uslov:

$$\mu t \leq \ln \frac{\beta}{\alpha}, \quad \forall t \in \tau, \quad (115)$$

gde  $\alpha, \beta \in \mathbf{R}$  i  $\mu = \Lambda(H)/\Lambda(P)$  kada je  $\Lambda(H) \leq 0$ , ili  $\mu = \Lambda(H)/\lambda(P)$ , kada je  $\Lambda(H) > 0$ , gde je matrica  $H$  definisana jed. (112 – 113), a  $L$  zadovoljava jed. (47). Štaviše, ako je  $\Lambda(H) \leq 0$ , tj. ako je matrica  $H$  negativno poluodređena, tada je  $\tau = [0, +\infty]$  i moguće je usvojiti  $\alpha = \beta$ .

Ako je  $\Lambda(Z) > 0$ , tada je  $\tau = [0, T]$ ,  $T < +\infty$ , a da bi se obezbedilo da  $T > 0$ , mora da bude  $\alpha < \beta$ .

*Dokaz.* Jedina razlika u odnosu na dokazuje prethodnih rezultata je činjenica da izbor agregacione funkcije sada treba izvršiti na sledeći način:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{x}(t)) &= \mathbf{x}_1^T(t) \left( (A_1 + A_2L)^T P + P(A_1 + A_2L) \right) \mathbf{x}_1(t) \\ &= \mathbf{x}_1^T(t) \left( (F_1 + F_2L)^T P + P(F_1 + F_2L) \right) \mathbf{x}_1(t). \end{aligned} \quad (116)$$

Koristeći sada *Pretpostavku 2*, dobija se:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1^T(t) \left( (F_1 + F_2L)^T P + P(F_1 + F_2L) \right) \mathbf{x}_1(t) &= \\ = 2\mathbf{x}_1^T(t) P(F_1 + F_2L) \mathbf{x}_1(t) &= \\ \leq 2\Lambda(P) (\|F_1\| + \|F_2\| \|L\|) \|\mathbf{x}_1(t)\|^2 &= \\ \leq 2\Lambda(P) (\varepsilon_1 + \varepsilon_2\varepsilon_3) \|\mathbf{x}_1(t)\|^2 &= \\ = \varepsilon \mathbf{x}_1^T(t) I_n \mathbf{x}_1(t). & \end{aligned} \quad (117)$$

Iz prethodne jednačine sledi:

$$\dot{V}(\mathbf{x}(t)) = \mathbf{x}_1^T(t) \left( (A_1 + A_2L)^T P + P(A_1 + A_2L) \right) \mathbf{x}_1(t) + \varepsilon \mathbf{x}_1^T(t) I_n \mathbf{x}_1(t) \leq \mathbf{x}_1^T(t) H \mathbf{x}_1(t) \leq \Lambda(H) \|\mathbf{x}_1(t)\|^2. \quad (118)$$

Preostali deo dokaza identičan je već izloženim postupcima, pa se stoga ovde ne navodi.

*Teorema 8.* Neka su *Pretpostavka 2* i jed. (46) zadovoljene i neka je matrica  $Q$  definisana jed. (114). Tada postoje  $\{\tau, \alpha, \beta, Q\}$  – *praktično stabilna* rešenja sistema, datog jed. (109–110), koja zadovoljavaju jed. (45), ako su ispunjeni sledeći uslovi:

$$\mu t \leq \ln \frac{\beta_1}{\alpha}, \quad \forall t \in \tau, \quad (119)$$

$$\|L\|^2 \leq \beta_1 / \beta_2. \quad (120)$$

Prpratni tekst i dokaz ove *Teoreme* ni u čemu se ne razlikuje od prethodne, s tom razlikom da umesto matrice  $Z$ , treba uneti matricu  $H$  [16].

*Teorema 9.* Neka je  $\Delta_r = \{\tau, \alpha, \beta_1, \beta_2\}$  i neka su zadovoljeni uslovi *Teoreme* 7. Tada je procena  $D_e$  potencijalnog dome- na  $\{\tau, \alpha, \beta_1, \beta_2\}$  – praktične stabilnosti si- stema, datog jed. (109–110), definisana sledećom jednačinom:

$$D_e(\Delta_r) = \left. \begin{aligned} & \mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n; \\ & \mathbf{x}(t) \in \left\{ \mathcal{N} \left( \begin{bmatrix} L & -I_n \end{bmatrix} \right) \cap S_1(\alpha) \cap S_2(\alpha\beta_1 / \beta_2) \right\}, \end{aligned} \right\} \quad (121)$$

*Dokaz.* Sledi direktno iz prethodnih *Teo- rema* [16].

### Numerički primeri

Ilustrujmo primenu prethodno izložeh- nih rezultata na konkretnim primerima.

*Primer 1.* Linearan singularan sistem sa standardnim perturbacionim članom, dat je svojom kanoničkom vektorskom dife- rencijalnom jednačinom stanja [23].

$$\dot{\mathbf{x}}_1(t) = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}_1(t) + \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_2(t) + \mathbf{f}_1(\mathbf{x}(t))$$

$$\mathbf{0} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_1(t) + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_2(t)$$

Pretpostavka 1 je zadovoljena, tj.:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1(\mathbf{x}(t)) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

Zadovoljen je i uslov ranga:

$$\text{rang} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \text{rang} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = 2 \leq 2$$

a na osnovu sledeće matrične jednačine:

$$\mathbf{0} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} L$$

određuje se i nepoznata matrica  $L$ :

$$L = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Polazni nominalni singularni sistem je regularan, što se može lako proveriti koriš- ćenjem izraza, datog jed. (38).

Usvaja se matrica  $G = G^T$ :

$$G = \begin{bmatrix} 5 & 5 \\ 5 & 10 \end{bmatrix}$$

a odgovarajuća matrična Ljapunovljeva jednačina dobija sledeći oblik:

$$\left( \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right)^T P + P \left( \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right) = -2 \begin{bmatrix} 5 & 5 \\ 5 & 10 \end{bmatrix}$$

sa rešenjem:

$$P = \begin{bmatrix} 5 & \frac{10}{3} \\ \frac{10}{3} & 5 \end{bmatrix}, \quad P = P^T > 0.$$

Na osnovu *Teoreme* 3. za usvojeno  $G$  i određeno  $P$  dobijaju se sledeće singularne vrednosti relevantnih matrica:

$$\sigma_{\min}(G) = \sqrt{\lambda_{\min}(GG^T)} = 1,91$$

$$\sigma_{\max}(G) = \sqrt{\lambda_{\max}(GG^T)} = 8,33$$

pa su granice, pri kojima perturbovani si- stem zadržava svoje osobine, date sa:



$$\mu_1 = \frac{\sigma_{\min}(G)}{\sigma_{\max}(P)} = 0,23.$$

U primeni *Teoreme 4.* potrebno je sračunati vrednosti sledećih matrica:

$$G^{\frac{1}{2}} = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 3 \end{bmatrix} \quad G^{-\frac{1}{2}} = \begin{bmatrix} \frac{3}{5} & -\frac{1}{5} \\ -\frac{1}{5} & \frac{2}{5} \end{bmatrix}$$

pa su odgovarajuće singularne vrednosti matrica date sa:

$$\sigma_{\min} = 1,38 \quad \sigma_{\max} = 2,69$$

pa je konačno i:

$$\mu_2 = 0,51.$$

Može se pokazati da ukoliko se usvoji  $G = I$  matrica  $P$  uzima vrednost:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

pa su sledstveno granice dozvoljenih perturbacija određene sa:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu = 1$ . U literaturi je pokazano kako se može doći do najviše dozvoljenih granica perturbacija, što ovde nije od interesa.

#### Literatura:

- [1] Bajić, V. B., *Lyapunov's Direct Method in The Analysis of Singular Systems and Networks*, Shades Technical Publications, Hillcrest, Natal, RSA, 1992.
- [2] Bajić, V. B., *Existence of Practically Stable Solutions of Singular Linear Systems*, Technical Report TR95-02, Control Laboratory, Technikon, Natal, RSA, 1995.
- [3] Bajić, V. B., D. Lj. Debeljković, Z. Gajić, Existence of Solution Converging Toward the Origin of the Phase Space of Singular Linear Systems, *Proc. SA-UM*, Kragujevac, Yugoslavia, June (1992.a) 334-348, also in *Proc. AMSE Conference on System Analysis, Control and Design*, Lyon, France (1994) 171-184.

## Zaključak

Rad savremenih sistema automatskog upravljanja mora se kvalitetno odvijati i u uslovima delovanja nepredvidljivih perturbacija različitog porekla. Time se bavi teorija robustnosti. U ovom radu formulisane su i dokazane brojne teoreme koje omogućavaju efikasno utvrđivanje granica prihvatljivih perturbacija pri kome nominalan sistem zadržava svoje bitne osobine u pogledu stabilnosti kako u smislu Ljapunova tako i na konačnom vremenskom intervalu. Izneti rezultati praćeni su odgovarajućim primerima kako bi se na najprikladniji način prezentovali predloženi postupci i metodološki pristupi.

#### Dodatak A – Osnovna označavanja

Sa  $\mathcal{N}(F)$  i  $\mathcal{R}(F)$  označavaju se nulti prostor (jezgro) i domen ili područje vrednosti operatora  $F$ , sledstveno, tj.:

$$\mathcal{N}(F) = \{ \mathbf{x} : F\mathbf{x} = \mathbf{0}, \forall \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n \}, \quad (A3)$$

$$\mathcal{R}(F) = \{ \mathbf{y} \in \mathbf{R}^m, \mathbf{y} = F\mathbf{x}, \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n \}, \quad (A4)$$

pri čemu važi:

$$\dim \mathcal{N}(F) + \dim \mathcal{R}(F) = n. \quad (A5)$$

- [4] Bajić, V. B., D. Debeljković, Z. Gajić, B. Petrović, Weak Domain of Attraction and Existence of Solutions Convergent to the Origin of the Phase Space of Singular Linear Systems, *University of Belgrade, ETF, Series: Automatic Control*, (1) (1992.b) 53-62.
- [5] Bajić, V. B., D. Lj. Debeljković, M. Lazarević, K. Đurović, On the Robustness of Linear Singular Systems, *Proc. ETRAN Conference*, Niš, Yugoslavia (1994.b) 203-204.
- [6] Bajić, V. B., D. Lj. Debeljković, B. B. Bogićević, M. B. Jovanović, Non-Lyapunov Stability Robustness Consideration for Discrete Descriptor Linear Systems, *IMA J. Math. Control and Information*, (15) (1998) 105-115.

- [7] Bogičević, B. B., D. Lj. Debeljković, S. A. Milinković, M. B. Jovanović, Non-Lyapunov Stability and Quantitative Measures of Robustness of Linear Discrete-Time Singular Systems, *Proc. SAUM 95*, Novi Sad, Yugoslavia (1995) 250–257.
- [8] Campbell, S. L., *Singular Systems of Differential Equations*, Pitman, Marshfield, Mass., 1980.
- [9] Campbell, S. L., *Singular Systems of Differential Equations II*, Pitman, Marshfield, Mass., 1982.
- [10] Chen, H. G., K. W. Han, Improved Quantitative Measures of Robustness for Multivariable Systems, *IEEE Trans. Automat. Cont.*, AC - 39 (4) (1994) 807–810.
- [11] *Circuits, Systems and Signal Processing*, Special Issue on Semistate Systems, 5 (1) (1986).
- [12] *Circuits, Systems and Signal Processing*, Special Issue: Recent Advances in Singular Systems, 8 (3) (1989).
- [13] Debeljković, D. Lj., V. B. Bajić, S. A. Milinković, M. B. Jovanović, Quantitative Measures of Robustness of Generalized State Space Systems, *Proc. AMSE Conference on System Analysis, Control and Design*, Lyon, France (1994.a) 219–230.
- [14] Debeljković, D. Lj., V. B. Bajić, A. U. Grgić, S. A. Milinković, Further Results in Non-Lyapunov Stability Robustness of Generalized State Space Systems, *Proc. 1st IFAC Workshop on New Trends in Design of Control Systems*, Smolenice, Slovak Republic, 1 (1994.b) 255–260.
- [15] Debeljković, D. Lj., V. B. Bajić, A. U. Grgić, S. A. Milinković, Non-Lyapunov Stability and Instability Robustness Analysis for Linear Descriptor Systems, *AMSE Periodicals – Advances in Modeling and Analysis*, 49 (1) (1995.a) 59–64.
- [16] Debeljković, D. Lj., V. B. Bajić, A. U. Grgić, S. A. Milinković, Non-Lyapunov Stability and Instability Robustness Consideration for Linear Singular Systems, *Proc. ECC95*, Roma, Italy (1995.b) 3702–3707.
- [17] Debeljković, D. Lj., S. A. Milinković, M. B. Jovanović, *Application of Singular Systems Theory in Chemical Engineering*, MAPRET Lecture – Monograph, 12<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 96, Praha, Czech Republic (1996.a).
- [18] Debeljković, Lj. D., S. A. Milinković, M. B. Jovanović, *Continuous Singular Control Systems*, GIP Kultura, Beograd, 1996.b.
- [19] Debeljković, Lj. D., S. A. Milinković, M.B. Jovanović, Lj. A. Jacić, *Discrete Singular Control Systems*, GIP Kultura, Beograd, 1998a.
- [20] Debeljković, D. Lj., V. B. Bajić, T. Erić, S. A. Milinković, A Lyapunov Analysis of Stability Robustness Consideration for Discrete Descriptor Systems, *IMA J. Math. Control and Information*, (15) (1998b) 53–62.
- [21] Debeljković, D. Lj., D. H. Owens, On Practical Stability, *Proc. MELECON Conference*, Madrid (Spain), October (1985) 103–105.
- [22] Debeljković, D. Lj., D. H. Owens, On Non-Lyapunov Stability of Discrete Descriptor Systems, *Proc. EUROCON Conference*, Paris (France), April (1986) 406–409.
- [23] Đurović, K. *Analiza robusnosti stabilnosti Linearnih Vremenski neprekidnih Singularnih Sistema*, magistrski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 1996.
- [24] Lewis, F. L., A Survey of Linear Singular Systems, *Circ. Syst. Sig. Proc.*, 5 (1) (1986) 3–36.
- [25] Lewis, F. L., Recent Work in Singular Systems, *Proc. Int. Symp. on Sing. Syst.*, Atlanta, GA (1987) 20–24.
- [26] Owens, D. H., D. Lj. Debeljković, Consistency and Liapunov Stability of Linear Descriptor Systems: a Geometric Approach, *IMA Journal of Math. Control and Information*, (1985), No.2, 139–151.
- [27] Stevens, B. L., *Modeling, Simulation and Analysis with State Variables*, Report LG84RR002, Lockheed – Georgia Co., Marietta, GA, 1984.
- [28] Tseng, H. C., P. V. Kokotović, Optimal Control in Singularly Perturbed Systems: The Integral Manifold Approach, *IEEE Proc. on CDC*, Austin, TX (1988) 1177–1181.
- [29] Yedavalli, R.K., Improved Measures of Stability Robustness for Linear State Space Models, *IEEE Trans. Automat. Cont.*, AC – 30 (6) (1985) 557–579.

**Mr Obrad Čabarkapa,**  
major, dipl. inž.

Uprava za naučnu i izdavačku  
delatnost GŠ VJ,  
Beograd

**Dr Ljubiša Tančić,**  
pukovnik, dipl. inž.

Vojna akademija VJ, Odsek logistike,  
Beograd

## KOREKCIJA TEORIJSKIH I EKSPERIMENTALNIH REZULTATA JEDINIČNE BRZINE SAGOREVANJA BARUTA U CEVI ORUŽJA

UDC: 623.52:531.57

### Rezime:

Jedinična brzina sagorevanja ( $u_{z0}$ ) polazni je parametar za koji je na osnovu faktorske analize ustanovljeno da najviše utiče na izlazne unutrašnjobalističke karakteristike, kako samostalno, tako i u kombinaciji sa ostalim parametrima. Pored analize uticaja jedinične brzine sagorevanja (sa minimalno i maksimalno dozvoljenim odstupanjima od srednje vrednosti), na izlazne unutrašnjobalističke karakteristike (maksimalni pritisak i početna brzina), u radu je prikazan postupak usaglašavanja teorijskih sa eksperimentalnim rezultatima.

**Ključne reči:** jedinična brzina sagorevanja, teorijski rezultati, eksperimentalni rezultati, usaglašavanje rezultata proračuna.

---

## CORRECTION OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESULTS OF THE POWDER COMBUSTION UNIT VELOCITY IN WEAPON BARREL

### Summary:

The factor analysis found out that the combustion unit velocity ( $u_{z0}$ ) is the initial parameter which affects mostly the outlet internal ballistic characteristics, both independently and combined with other parameters. Beside the analysis of the impact of the combustion unit velocity (with the minimum and the maximum allowed deviations from its average value) on the outlet internal ballistic characteristics (maximum pressure and initial velocity), the paper deals with the procedure of matching the theoretical with the experimental results.

**Key words:** combustion unit velocity, theoretical results, experimental results, matching of the calculation results.

---

### Uvod

Klasični modeli unutrašnje balistike analiziraju određeni broj parametara (pritisak i temperaturu barutnih gasova, brzinu i put projektila, vreme trajanja procesa), dajući njihove srednje vrednosti u zapremini iza projektila. Pored ovih postoje brojni parametri (poroznost, gustina, energija barutnih gasova, brzina barutnih gasova i barutnih zrna, ...) koje

treba istražiti. Za sve parametre zajedničko je da u određenom momentu imaju različite vrednosti u zapremini iza projektila. Za analizu ovih parametara koriste se dvofazni modeli, odnosno gasodinamičke teorije strujanja.

Uticaj jedinične brzine sagorevanja analiziran je na maksimalnom pritisku barutnih gasova ( $p_{max}$ ) i početnoj brzini zrna ( $V_0$ ), kao veoma važnim izlaznim unutrašnjobalističkim karakteristikama

svakog oružja. Za korekciju proračunskih rezultata sa eksperimentalnim rezultatima jedinične brzine sagorevanja baruta odabrana je Boks-Vilsonova metoda, koja se može veoma uspešno primeniti, jer kod eksperimentalnog modeliranja sadrži postupna približenja rezultata do usvajanja definitivnog modela.

Predmet istraživanja u ovom radu je korekcija teorijskih sa eksperimentalnim vrednostima jedinične brzine sagorevanja baruta na modelu dvofaznog strujanja kod automatske puške 7,62 mm M70, kao najzastupljenijeg streljačkog oružja u naoružanju VJ.

### Faktorska analiza uticaja jedinične brzine sagorevanja na model dvofaznog strujanja

Brzina sagorevanja baruta linearno je zavisna od pritiska, i može se prikazati izrazom:

$$u_z = u_{z0}p \quad (1)$$

gde je:

$u_z$  – brzina sagorevanja baruta,  
 $u_{z0}$  – jedinična brzina sagorevanja baruta,  
 $p$  – pritisak barutnih gasova.

Jedinična brzina sagorevanja baruta ( $u_{z0}$ ) predstavlja konstantu u izrazu za brzinu sagorevanja baruta i zavisi od hemijskog sastava baruta.

Ako se sa  $r$  označi dubina prodiranja plamena u barutno zrno u jednom smeru, onda je:

$$\frac{\partial r}{\partial t} = u_z \quad (2)$$

Veličina  $r$  se menja od nule do  $r_0$ , gde je  $r_0$  polovina najmanje dimenzije barutnog zrna. Kako je pritisak funkcija

od  $(t, x)$ , to je i  $u_z$  funkcija od  $(t, x)$ . Za fiksni položaj  $x$ , integracijom izraza (1) dobija se zavisnost  $r$  od  $t$ .

Korektnost izraza (1) dokazana je eksperimentom u manometarskoj bombi – uređaju za ispitivanje sagorevanja baruta u konstantnoj zapremini.

Iz izraza (1) i (2), integracijom po  $r$  od nule (početak sagorevanja) do  $r_0$  (kraj sagorevanja), dobija se:

$$r_0 = u_{z0} \int_0^{t_k} p dt = u_{z0} I_k \quad (3)$$

gde je:

$t_k$  – ukupno vreme sagorevanja,  
 $I_k$  – ukupan impuls pritiska barutnih gasova.

Kako je  $r_0 = \text{const.}$  i  $u_{z0} = \text{const.}$ , tako je i  $I_k = \text{const.}$  Drugim rečima, bez obzira na to kolika masa baruta sagoreva u manometarskoj bombi, uvek će se za istu vrstu baruta dobijati ista površina ispod krive pritiska, čime je dokazana korektnost izraza (1).

Postoji niz izlaznih karakteristika, ali kao veoma važne kod svakog oružja smatraju se maksimalni pritisak i početna brzina, te su sve dalje analize uticaja jedinične brzine sagorevanja u ovom radu vršene na osnovu dobijenih rezultata proračuna za ove dve veličine.

Srednje vrednosti jedinične brzine sagorevanja, kao i maksimalno i minimalno dozvoljena odstupanja od srednje vrednosti, i svi ostali polazni parametri propisani su prema [5, 6].

Da bi se što realnije sagledao uticaj jedinične brzine sagorevanja na model dvofaznog strujanja, neophodno je realizovati jednofaktorni eksperiment. Pri realizaciji ovog eksperimenta, radi sticanja uvida u karakter promena izlaznih karakteristika, pri proračunu su kod jedi-

	Parametar $u_{z0}$	$P_{max}$ (bar)	$\Delta P_{max}$		$V_0$ (m/s)	$\Delta V_0$	
			bar	%		m/s	%
srednja vrednost	7,767 E-10 (uz dozvoljeno odstupanje od $\pm 1,2\%$ )						
maks. vrednost	7,859 E-10	3222 ↑	77 ↑	2,45	735,50 ↑	8,20 ↑	1,13
min. vrednost	7,675 E-10	3069 ↓	76 ↓	2,42	718,63 ↓	8,66 ↓	1,19

nične brzine sagorevanja varirane vrednosti za minimalno i maksimalno dozvoljena odstupanja, dok su ostali parametri zadržavani na konstantnom nivou.

Na isti način, analizirajući uticaj svih ostalih polaznih parametara, dolazi se do zaključka da jedinična brzina sagorevanja baruta samostalno, pri promeni u granicama dozvoljenih odstupanja, najviše utiče na maksimalni pritisak i početnu brzinu.

Dozvoljena odstupanja od srednje vrednosti za jediničnu brzinu sagorevanja, kao i karakter promene (↑ – rast, ↓ – pad) maksimalnog pritiska barutnih gasova ( $p_{max}$ ) i početne brzine projektila ( $V_0$ ), prikazani su u tabeli 1.

Pored samostalnog uticaja na izlazne karakteristike  $u_{z0}$  utiče i u kombinaciji sa drugim parametrima. Postavlja se pitanje kako pored jedinične brzine sagorevanja odabrati ostale parametre koje treba analizirati u faktorskom eksperimentu. Odgovor na pitanje kakav je taj uticaj daje faktorska analiza. Svaki od posmatranih parametara može da ima niz vrednosti unutar dozvoljenih odstupanja od svoje srednje vrednosti, koji se zove broj nivoa faktora. U radu se navode dva: donji (minimalna vrednost faktora) i gornji (maksimalna vrednost faktora).

Da bi se odredili parametri koji najviše utiču na promenu izlaznih karakteristika, pored jednofaktorskog eksperimenta, realizovana su i dva faktorska plana eksperimenta  $2^3$  i jedan  $2^4$ . Iz svih sprovedenih faktorskih analiza dolazi se

do zaključka da na maksimalni pritisak barutnih gasova i početnu brzinu projektila, na osnovu dobijenih podataka za  $v_0$  – parametar značaja izvora, uvek najveći uticaj ima jedinična brzina sagorevanja.

U realizaciji faktorskog plana eksperimenta  $2^4$ , prema modelu [7], pored jedinične brzine sagorevanja analizirani su: početna masa barutnog zrna, početna površina barutnog zrna i početna masa baruta, kao parametri koji, takođe, znatno utiču na izlazne karakteristike.

Za odabrana četiri parametra realizovan je potpuni faktorski plan eksperimenta  $2^4$  i izvršena disperziona i regresivna analiza uticaja signifikantnih faktora na maksimalni pritisak i početnu brzinu, što je detaljnije prikazano u radu [10].

Na osnovu realizovane disperzione analize može se zaključiti da je uticaj posmatranih parametara na rezultate eksperimenta veoma značajan i da se njihov uticaj na maksimalni pritisak može rangirati prema sledećem:

- 1 – jedinična brzina sagorevanja baruta,
- 2–3 – početna masa barutnog zrna,
- 2–3 – početna površina barutnog zrna,
- 4 – početna masa baruta.

Najveći uticaj na veličinu maksimalnog pritiska barutnih gasova ima jedinična brzina sagorevanja baruta, dok isti uticaj imaju početna masa barutnog zrna i početna površina barutnog zrna, a najmanji uticaj ima početna masa baruta.

Međudejstva ovih parametara, takođe, utiču na maksimalni pritisak, ali u znatno manjoj meri od samostalnog dejstva faktora.

Matematički model za maksimalni pritisak barutnih gasova, zasnovan na dobijenim rezultatima, ima sledeći oblik:

$$Y_{ijkl} = \mu + u_{z0i} + m_{z0j} + S_{z0k} + m_{b0l} + m_{z0j}u_{z0i} + m_{z0j}m_{b0l} + u_{z0i}m_{b0l} + m_{z0j}S_{z0k} + u_{z0i}S_{z0k} + m_{b0l}S_{z0k} + \varepsilon_{ijkl} \quad (4)$$

gde je:

$Y_{ijkl}$  – vrednost rezultata eksperimenta za bilo koju kombinaciju faktora ( $p_{max}$ ),

$\mu$  – srednja vrednost svakog od faktora (posmatranih veličina),

$u_{z0i}$  – doprinos maksimalnom pritisku koji daje jedinična brzina sagorevanja baruta,

$m_{z0j}$  – doprinos maksimalnom pritisku koji daje početna masa barutnog zrna,

$m_{b0l}$  – doprinos maksimalnom pritisku koji daje početna masa baruta,

$S_{z0k}$  – doprinos maksimalnom pritisku koji daje početna površina barutnog zrna,

$\varepsilon_{ijkl}$  – greška eksperimenta,

$i = j = k = l = 1 = 2$  – broj nivoa svakog od faktora.

Rangiranje uticaja posmatranih parametara na početnu brzinu može se izvršiti prema sledećem:

1 – jedinična brzina sagorevanja baruta,

2 – početna masa baruta,

3–4 – početna masa barutnog zrna,

3–4 – početna površina barutnog zrna.

Najveći uticaj na veličinu početne brzine projektila ima jedinična brzina sagorevanja baruta, drugi po uticaju je početna masa baruta, dok su treći, odnosno četvrti po uticaju početna masa barutnog zrna i početna površina barutnog

zrna. Disperziona analiza, za sve veličine, pokazuje da su i uticaji međudejstva faktora na početnu brzinu zanemarljivi. To znači da ova četiri faktora utiču na početnu brzinu projektila, ali među njima nema međudejstva, tj. svaki od njih deluje samostalno na posmatrani proces.

Analogno, kao i za maksimalni pritisak, matematički model za početnu brzinu projektila zasnovan na dobijenim rezultatima, ima sledeći oblik:

$$Y_{ijkl} = \mu + u_{z0i} + m_{b0j} + m_{z0k} + S_{z0l} + \varepsilon_{ijkl} \quad (5)$$

gde je:

$Y_{ijkl}$  – vrednost rezultata eksperimenta za bilo koju kombinaciju faktora (vrednost početne brzine),

$\mu$  – srednja vrednost svakog od faktora (posmatranih veličina),

$u_{z0i}$  – doprinos početnoj brzini koji daje jedinična brzina sagorevanja baruta,

$m_{b0j}$  – doprinos početnoj brzini koji daje početna masa baruta,

$m_{z0k}$  – doprinos početnoj brzini koji daje početna masa barutnog zrna,

$S_{z0l}$  – doprinos početnoj brzini koji daje početna površina barutnog zrna,

$\varepsilon_{ijkl}$  – greška eksperimenta,  $i = j = k = l = 1 = 2$  – broj nivoa svakog od faktora.

Matematički modeli disperziona analize za maksimalni pritisak i početnu brzinu (izrazi 4 i 5) koriste se u regresivnoj analizi rezultata eksperimenta i, u suštini, znače da se maksimalni pritisak i početna brzina projektila rasipaju oko neke srednje vrednosti pod uticajem analiziranih faktora.

Regresivnom analizom dolazi se do kodiranih regresivnih polinoma (svaki od faktora koji su njegovi članovi može da ima samo dve vrednosti: +1 kada su na gornjem nivou i -1 kada su na donjem nivou):

– za veličinu maksimalnog pritiska barutnih gasova:

$$p_m = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_{34} \quad (6)$$

– za veličinu početne brzine zrna:

$$V_0 = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 \quad (7)$$

gde je:

$b_0$  – srednja vrednost,

$b_i$  – regresivni koeficijenti,

$X_i$  – faktori.

Iz regresivnih polinoma dobijaju se dve vrednosti za maksimalni pritisak i to:  $p_m = 3430,6875$  (kada su faktori na gornjem nivou) i  $p_m = 2862,4375$  (kada su faktori na donjem nivou). U odnosu na srednju vrednost maksimalnog pritiska dobija se odstupanje od  $\pm 284,125$  bara, što ukazuje na to da ovi parametri bitno utiču na maksimalni pritisak barutnih gasova, jer ga menjaju za 9% od srednje vrednosti.

Analogno je i za početnu brzinu  $V_0 = 756$  m/s (kada su faktori na gornjem nivou) i  $V_0 = 697,75$  m/s (kada su faktori na donjem nivou). U odnosu na srednju vrednost početne brzine zrna dobija se odstupanje od  $\pm 29,125$  m/s, što ukazuje na to da ovi parametri bitno utiču na početnu brzinu projektila, jer je menjaju od srednje vrednosti za 4%.

Na osnovu programskog rešenja [1, 2] i srednjih vrednosti analiziranih polaznih parametara izvršen je proračun prema opisanom modelu dvofaznog strujanja. Dobijeni rezultati proračuna mogu se prikazati tabelarno i grafički [10]. Sve karakteristike procesa opaljenja u cevi oružja funkcije su dve nezavisne promen-

ljive ( $t, x$ ). To znači da zavise i od vremena i od položaja u cevi i biće opisane prostornim krivim površinama. U tome je i osnovna razlika između klasične teorije i teorije dvofaznog strujanja.

### **Eksperimentalni rezultati proračuna**

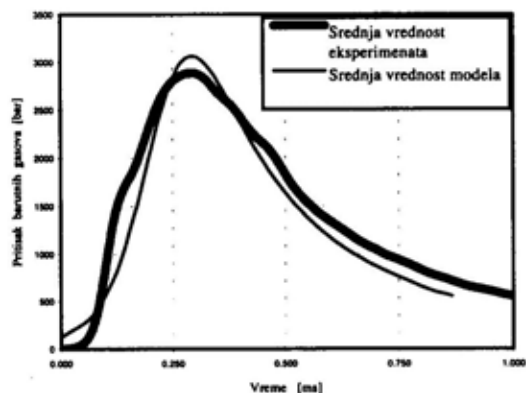
Eksperimentalna istraživanja [2] realizovana su na cevima automatske puške kalibra 7,62 mm. Za realizaciju eksperimenata konstruisan je poseban uređaj za merenje pritiska duž cevi, koji je adaptiran tako da se mogu menjati cevi različitih vrsta oružja i različitih kalibara, tj. radi se o uređaju univerzalne namene. Pritisak barutnih gasova duž cevi automatske puške meren je na 9 mernih mesta pomoću piezoelektričnih pretvarača pritiska. Na mestima gde je meren pritisak vršeno je bušenje cevi, gde su pomoću posebno uređenih nosača fiksirani pretvarači pritiska. Izvršeno je 46 opaljenja, dok je na osnovu statističke teorije za dalje analize vršena obrada uzorka od 30 opaljenja, što se smatra velikim uzorkom koji verno oslikava posmatrani proces.

Za upoređivanje rezultata proračuna po modelu, i rezultata eksperimenata korišćeni su rezultati merenja na mernom mestu 1, koje se nalazi na 387,80 mm od usta cevi, odnosno na 26,50 mm od dna čaure. Udaljenost projektila od dna čaure iznosi 28 mm. Dakle, merno mesto 1 nalazi se u čauri metka i počinje da registruje pritisak odmah nakon opaljenja kapisle. Prema tome, početak krive pritiska na mernom mestu 1 je i početak procesa opaljenja. Za upoređivanje sa rezultatima proračuna koristi se srednji pritisak eksperimenata za merno mesto 1, dobijen kao srednja vrednost svih analiziranih pojedinačnih opaljenja.

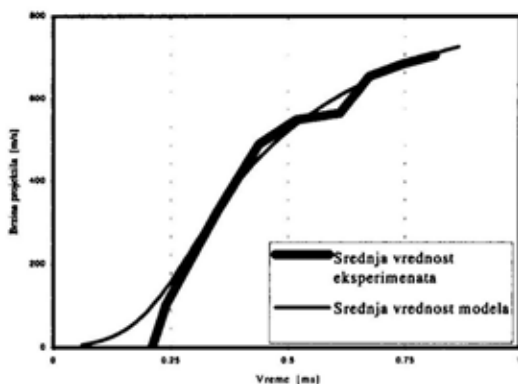
Pritisak barutnih gasova u cevi je rastuća pa opadajuća funkcija. Vrednosti pritiska barutnih gasova na različitim mestima u cevi, za isti trenutak, imaju različitu vrednost u modelu i u eksperimentu, što ukazuje na to da je pritisak funkcija puta i vremena. Kako krive predstavljaju vremensku promenu pritiska na određenom mestu u cevi, to se sukcesivnim vertikalnim presecanjima krivih dobijaju pritisci na datim mernim mestima u fiksnom vremenu, i mogu se uporediti sa podacima proračuna.

Eksperimentalna brzina projektila u cevi određena je na osnovu udaljenosti mernih mesta i vremena dolaska pritiska na merno mesto. Kako su merna mesta relativno blizu jedno drugom, na osnovu rezultata eksperimenata može se izvesti zaključak o promeni brzine projektila duž cevi. Na taj način dolazi se do prosečne srednje vrednosti početne brzine projektila eksperimenata od 723,6 m/s, a srednja vrednost po modelu iznosi 726,8 m/s. To odstupanje je neznatno.

Rezultati maksimalnog pritiska i početne brzine, dobijeni eksperimentalnim istraživanjima [2] i proračunom [7], grafički su prikazani na slikama 1 i 2.



Sl. 1 – Dijagrami  $p(t)$  srednjih vrednosti modela i eksperimenata



Sl. 2 – Dijagrami  $v(t)$  srednjih vrednosti modela i eksperimenata

### Usaglašavanje teorijskih i eksperimentalnih rezultata jedinične brzine sagorevanja baruta

Za usaglašavanje teorijskih i eksperimentalnih rezultata jedinične brzine sagorevanja baruta postoje dva načina, i to korekcija rezultata eksperimenata ili korekcija modela. Da bi se znalo koji način treba izabrati, potrebno je piezoelektrične merne pretvarače pritiska postaviti bliže zidu cevi, zatim utvrditi stvarni razlog odstupanja, pa tek onda izvršiti korekciju modela, ako je potrebno.

Pri korekciji rezultata eksperimenata poželjno je: prvo realizovati eksperiment iz cevi sa 1 mernim mestom, zatim redom realizovati eksperimente iz cevi sa 2 merna mesta, pa sa 3 merna mesta i tako redom. Na ovaj način realizacija eksperimenata iziskuje znatno više finansijskih sredstava i duže vreme. Na kraju se vrši analiza iz „bušene“ i „nebušene“ cevi.

Kod modela je neophodno: izvršiti korekciju polaznih pretpostavki, zatim korekciju za povećanje zapremine zbog bušenja cevi radi postavljanja piezoelektričnih mernih pretvarača pritiska i korekciju zbog postojanja prelaznog konusa i postupnog urezivanja.



Poželjno je da se izvrše obe korekcije – i modela i eksperimenata.

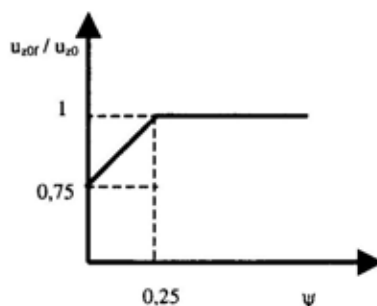
Ukoliko je moguće izvršiti usaglašavanje rezultata modela i eksperimenata, model se može koristiti kao simulator procesa opaljenja.

Kako je kod svih provedenih faktorskih analiza utvrđeno da jedinična brzina sagorevanja baruta najviše utiče na promenu izlaznih karakteristika, tim se parametrom vrši korekcija rezultata modela i usaglašavanje sa rezultatima eksperimenata.

U polaznim podacima za proračun po modelu za jediničnu brzinu sagorevanja baruta uzima se konstantna vrednost tokom celog vremena trajanja procesa opaljenja. Jedinična brzina sagorevanja određuje se eksperimentalno [8, 9]. Ona zavisi od hemijskog sastava barutne mase i menja se promenom isparljivih materija i sadržajem azota u barutnoj masi. Veća jedinična brzina sagorevanja u početnom delu procesa opaljenja omogućuje veći priliv barutnih gasova, a samim tim i veći pritisak barutnih gasova.

S druge strane, da bi izvršili korekciju rezultata radi dobijanja nižih vrednosti pritisaka, neophodno je da jedinična brzina sagorevanja bude manja. To se može postići sa flegmatizovanim barutom i to variranjem dubine prodora flegmatizatora, odnosno smanjenjem jedinične brzine sagorevanja do dubine barutnog zrna do koje je prodro flegmatizator. Najveća koncentracija flegmatizatora je na površini barutnog zrna, dok je hemijski sastav barutnog zrna promenljiv do dubine prodora flegmatizatora, pa je samim tim i jedinična brzina sagorevanja promenljiva. Zbog smanjene brzine sagorevanja priliv barutnih gasova je sporiji, što usporava i porast pritiska barutnih gasova. Vrednosti krive  $p(t)$  kod flegma-

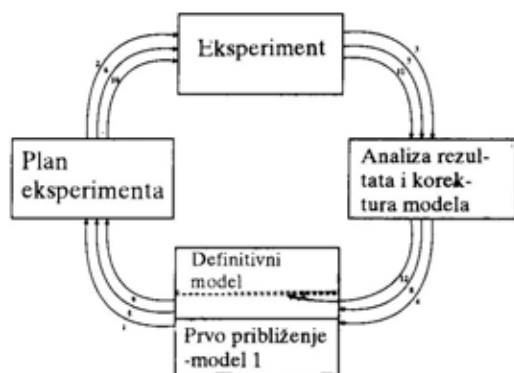
tizovanog baruta su niže u odnosu na isti barut koji nije flegmatizovan. Posle određenog vremena, kada sagori debljina barutnog zrna do koje je prodro flegmatizator, krive pritisaka se poklapaju jer više nema flegmatizatora. Odnos jediničnih brzina sagorevanja flegmatizovanog ( $u_{zof}$ ) i neflegmatizovanog ( $u_{z0}$ ) baruta, u odnosu na relativno sagorelu masu baruta ( $\psi$ ), prikazan je na slici 3. Vrednost za  $\psi$  od 0,25 podrazumeva da je flegmatizator prodro do jedne četvrtine debljine barutnog zrna.



Sl. 3 – Grafički prikaz jediničnih brzina sagorevanja flegmatizovanog i neflegmatizovanog baruta

Prema prethodnim razmatranjima za jediničnu brzinu sagorevanja i korekcijom modela na taj način da se ovaj polazni parametar ne razmatra kao konstantan sve vreme trajanja procesa opaljenja, već da u početnom delu ima manju vrednost, a da je kasnije konstantan, postiže se bolja podudarnost srednjih krivih pritisaka po modelu i eksperimentu.

Korekcija rezultata proračuna po modelu, putem variranja jedinične brzine sagorevanja flegmatizovanog baruta, može se izvršiti primenom Boks-Vilsoнове metode [4]. Boks-Vilsonova metoda, koja sadrži postupna približenja kod eksperimentalnog modeliranja, prikazuje se u vidu spiralnog dijagrama (slika 4).



Sl. 4 – Spiralni dijagram Boks-Vilsonove metode

Postupna približenja se ponavljaju sve dok se ne ostvari zadovoljavajuća saglasnost rezultata modela sa rezultatima eksperimenata. U tabeli 2 dat je pregled dobijenih vrednosti maksimalnog pritiska barutnih gasova i početne brzine projektila sa flegmatizovanim barutom i uz primenu postupka postupnog približavanja rezultata proračuna.

U tabeli 2 \* označava nepotpuno sagorevanje baruta. Upoređujući rezulta-

te iz tabele 2 sa srednjim eksperimentalnim rezultatima za merno mesto 1, uočava se da se najbolja usaglašenost postiže primenom flegmatizovanog baruta kod kojeg je flegmatizator prodro do jedne trećine debljine barutnog zrna, i sa početnom jediničnom brzinom sagorevanja od  $7,5 \text{ E-}10 \text{ m/s}$ . Nakon što sagori debljina barutnog zrna do koje je prodro flegmatizator, preostali deo barutnog zrna sagoreva sa jediničnom brzinom sagorevanja od  $7,767 \text{ E-}10 \text{ m/s}$ , tj. sa njenom srednjom vrednošću koja je razmatrana kod proračuna u faktorskoj analizi. Sa ovim barutom postiže se usaglašenost maksimalnog pritiska ispod 1%, a početne brzine ispod  $5 \text{ m/s}$ .

### Zaključak

Jedinična brzina sagorevanja baruta u modelu dvofaznog strujanja je parametar za koji je realizacijom jednofaktornog eksperimenta dokazano da dominantno utiče na maksimalni pritisak barutnih ga-

Tabela 2

Jedinična brzina sagorevanja $u_{20}$	Dubina prodora flegmatizatora u barutno zrno (m)	Maksimalni pritisak (bar)	Početna brzina (m/s)
7,5 E-10	1/2	2933	718,68
	1/3	2960	722,13
	1/4	2985	724,06
	1/5	3002	725,35
7,0 E-10	1/2	2638	690,12
	1/3	2709	700,99
	1/4	2778	707,71
	1/5	2829	712,19
6,5 E-10	1/2	2348	664,38*
	1/3	2451	676,31
	1/4	2560	688,39
	1/5	2645	696,21
6,0 E-10	1/2	2064	655,59*
	1/3	2189	656,84*
	1/4	2332	665,26
	1/5	2449	677,76

sova i početnu brzinu projektila, kao bitne karakteristike procesa opaljenja. Faktorskom analizom ispitan je uticaj ovog parametra u sadejstvu sa sledećim parametrima: početna masa barutnog zrna, početna površina barutnog zrna i početna masa baruta. Kod svih realizovanih faktorskih analiza utvrđeno je da na promenu izlaznih karakteristika najviše utiče jedinična brzina sagorevanja.

Disperzionom i regresivnom analizom izvršeno je rangiranje analiziranih signifikantnih parametara, kako samostalno tako i njihovog međudejstva. Formirani su regresivni polinomi za maksimalni pritisak i početnu brzinu, gde su dobijene srednje vrednosti, kao i dozvoljene granice rasipanja oko srednjih vrednosti.

Izvršena je komparativna analiza dobijenih rezultata proračuna sa rezultatima eksperimenata i dat grafički prikaz rezultata. Pri komparativnoj analizi rezultata modela i eksperimenata u postupku modeliranja prikazana je korekcija rezultata modela primenom Boks-Vilsonove metode postupnih približenja, radi usaglašavanja sa rezultatima eksperimenata, do

trenutka prihvatanja definitivnog modela. Korekcija teorijskih i eksperimentalnih rezultata jedinične brzine sagorevanja vršena je putem primene flegmatizovanog baruta, do trenutka postizanja usaglašenosti maksimalnog pritiska ispod 1% i početne brzine ispod 5 m/s.

#### Literatura:

- [1] Cvetković, M.: Unutrašnja balistika, Vojnoizdavački zavod, Beograd, 1998.
- [2] Tančić, Lj.: Numeričko rešenje nestacionarnog modela unutrašnje balistike malih kalibara, doktorska disertacija, Beograd, 1997.
- [3] Cvetković, M., Tančić, Lj.: A comparisons analysis experimental and calculations results for twophase flow in the small arms, II International Symposium Contemporary Problems of Fluid Mechanics, Beograd, 1996.
- [4] Pantelić, I.: Uvod u teoriju inženjerskog eksperimenta, Radnički univerzitet – Radivoj Ćirpanov, Novi Sad, 1976.
- [5] \*\*\*: Propis o kvalitetu proizvoda (PKS), SOUR Prvi partizan RO Namenska proizvodnja, Užice, 1987.
- [6] \*\*\*: Commission Internationale Permanente (CIP), Geneve, 1985.
- [7] Čabarkapa, O.: Istraživanje polaznih parametara za model dvofaznog strujanja u cevi oružja, magistarski rad, Beograd, 2000.
- [8] Budiselić, M.: Unutrašnja balistika I i II, TŠC KoV JNA, Zagreb, 1971.
- [9] Viličić, J., Gajić, M.: Balistika, Vojnoizdavački zavod, Beograd, 1979.
- [10] Čabarkapa, O.: Faktorska analiza najuticajnijih polaznih parametara na model dvofaznog strujanja u cevi automatske puške, članak VTG br. 3 i 4-5, VIZ, Beograd, 2000.

**Dr Zoran Ristić,**  
pukovnik, dipl. inž.  
**Sc Slobodan Ilić,**  
kapetan I klase, dipl. inž.  
Vojna akademija VJ, Odsek logistike,  
Beograd  
**Mr Mile Davidović,**  
dipl. inž.

## ODREĐIVANJE OPTIMALNIH VREDNOSTI IZLAZNIH PARAMETARA HIDRAULIČNE KOČNICE TRZANJA ARTILJERIJSKOG ORUĐA

UDC: 62-592.2:623.57:623.41/.42]:519.673

### Rezime:

*U radu je prikazano numeričko rešenje modela hidraulične kočnice trzanja artiljerijskog oruđa. U postupku numeričkog modeliranja izrađen je algoritam i odgovarajuće programsko rešenje za identifikaciju dinamičkog odziva karakterističnih parametara kočnice i simulaciju procesa trzanja. Izvršena je analiza uticaja polaznih veličina kočnice na nivo izlaznih parametara, kao i optimizacija izlaznih proračunskih parametara kočnice prema definisanim ograničenjima.*

*Ključne reči: hidraulična kočnica, sila otpora kočnice, pritisak tečnosti, proces trzanja.*

## DEFINING OPTIMAL VALUES OF OUTPUT PARAMETERS OF THE HYDRAULIC RECOIL BRAKE IN THE ARTILLERY WEAPON

### Summary:

*A numerical solution of a model for the hydraulic recoil brake in the artillery weapon is presented. A program solution and an algorithm for the identification of dynamic recoil brake parameters and the recoil process simulation have been worked out in the procedure of numerical modeling. The analysis of the influence of hydraulic brake input parameters on the level of estimated parameters has been performed as well as the optimization of estimated parameters to according to defined limitations .*

*Key words: hydraulic recoil brake, hydraulic-braking force, fluid pressure, recoil process.*

### Uvod

Impuls sile trzanja, odnosno količina kretanja koju imaju projektil i barutni gasovi u procesu opaljenja iz cevi oruđa, predstavlja osnovni parametar koji utiče na dinamičko ponašanje artiljerijskog oruđa. Impuls trzanja se u punom iznosu prenosi na lafet oruđa posredstvom protivtrajućeg uređaja (PTU). U osnovi PTU je mehaničko-hidraulični sklop koji čine hidraulična kočnica trzanja i povratnik, kao glavni delovi elastične veze cevi i lafeta oruđa. Primarni zadatak uređaja

je da obezbedi kočenje trzajućih delova oruđa (cevi), odnosno formiranje potrebne sile ukupnog otpora trzanja  $R(x)$ , koja na određenoj dužini trzanja treba da neutrališe dejstvo sile trzanja.

Impuls trzanja je posledica reaktivnog dejstva pritiska barutnih gasova na dno kanala cevi, tj. sile trzanja  $F_g(t)$ , za vreme opaljenja, uključujući i period isticanja gasova iz cevi do momenta kada pritisak gasova padne na atmosferski. Definiše se poznatom relacijom u teoriji lafeta [1]:

Maksimalne vrednosti ubrzanja i brzine trzanja cevi

Oruđe (mm)	$a_{\max}$ (m/s <sup>2</sup> )		$v_{\max}$ (m/s)		$t_t$ (s)	$x_\lambda$ (m)
	t(m), s	x(m); m	t(m), s	x(m); m		
PT 100	1905		12,39		0,1890	0,838
	0,0052	0,012	0,0153	0,100		
TON 100	3703		13,98		0,1246	0,880
	0,0030	0,004	0,0210	0,244		
TH 152	3535		12,76		0,1686	0,885
	0,0054	0,012	0,0130	0,092		

t(m), x(m) – vreme trzanja i pomak cevi,

$t_t$  – ukupno vreme trzanja,

$x_\lambda$  – ukupni put trzanja.

$$I_t = \int_0^{t_t} F_g(t) dt$$

Maksimalne vrednosti sile  $F_g(t)$  na oruđima su reda veličine  $6 \cdot 10^6$  N, a vreme dejstva do 40 ms, što zavisi od veličine energije barutnog punjenja. Delovanje sile  $F_g(t)$  na trzajuću masu (u daljem tekstu cev) impulsnog je karaktera, usled čega se cev naglo ubrzava (zaleće) iz stanja mirovanja sa izrazito promenljivim ubrzanjem tokom vremena kretanja (tzv. nestacionarno kretanje pokretnih masa  $a = a(t)$ ).

Ubrzanja cevi oruđa u toku procesa trzanja su promenljiva i kreću se u granicama od 400 g do -70 g, a brzine trzanja od 5 do 18 m/s [2]. Radi ilustracije karakteristika promene parametara kretanja cevi, u tabeli 1 prikazane su maksimalne vrednosti ubrzanja i brzine trzanja cevi, koje su eksperimentalno utvrđene merenjem na nekim vrstama artiljerijskih oruđa.

Sa aspekta problema koji je predmet ovog rada, logički se nameću sledeća pitanja:

– kako treba da izgleda raspored kretanja, tj. algoritam brzine trzanja da bi se cev dovela do kraja trzanja;

– kojim modelima kočenja kretanja cevi kod oruđa sa hidrauličnom kočnicom trzanja se mogu izbeći ekstremne vrednosti sile inercije, s tim što bi se smanjivanjem njihovog intenziteta povećalo vreme u kojem deluju;

– sa kakvom promenom relevantnih parametara hidraulične kočnice se na zadatoj dužini trzanja  $x_\lambda$  može obezbediti potrebna zakonitost otpora kretanju cevi (kočenja) do njenog zaustavljanja uz zadovoljenje dinamičkih uslova stabilnosti i opterećenja lafeta oruđa.

Zavisno od namene oruđa, tehničkim zahtevima se traži da se zadati put trzanja ostvari u funkciji elevacionog ugla cevi ( $\varphi$ ) pri gađanju sa različitim barutnim punjenjima, odnosno promenljivim silama barutnog punjenja. U kinematskom smislu, zadati put trzanja može se postići sa različitim funkcijama promene brzine, ali uz uslov da na kraju trzanja brzina cevi mora biti jednaka nuli. Prema tome, ubrzanje cevi, odnosno kočenje, u ovom slučaju zavisi od brzine.

Može se postaviti pitanje šta se dešava u slučaju kada je put trzanja nula ili kada je veoma veliki.

U prvom slučaju, kada je put trzanja jednak nuli ( $x = 0$ ), lafet oruđa ne bi

imao klizače za vođenje cevi tokom kretanja, ali bi zbog velike sile u osloncu morao da bude veoma krut i vezan za jak oslonac. Drugi slučaj, kada je put trzanja veliki, zahteva male sile u osloncu lafeta ali veliku dužinu klizača. Maksimalni put trzanja definiše potrebnu dužinu klizača. Model kočenog trzanja, u ovom slučaju može se postaviti tako da su u periodu zaletanja cevi otpori kočenja mali a da je u fazi kočenja cevi kočenje sa konstantnim negativnim ubrzanjem do zaustavljanja cevi.

Ovde se nameću problemi – kako definisati optimalnu veličinu zadatog puta i kako u okviru zadatog puta definisati najmanju silu koja opterećuje lafet oruđa?

U teoretskom smislu najmanja sila ukupnog otpora trzanju, koja se prenosi na lafet je konstantna na celom putu trzanja:

$$R(x) = \frac{L_u}{x_\lambda} = \text{const.} \quad (1)$$

gde je:

$L_u = \frac{I_t^2}{2M_t} + M_t g x_\lambda \sin \varphi$  – ukupan rad sile, odnosno energija koja se unese u sistem,  
 $M_t$  – masa trzajućih delova,  
 $M_t g \sin \varphi$  – komponenta težine trzajuće mase.

U matematičkom smislu to bi bio potreban kriterijum za rešavanje diferencijalne jednačine kretanja cevi. Ako se optimalni put trzanja  $x_\lambda$  definiše prema taktičko-tehničkim zahtevima oruđa, pa je poznata funkcija puta od elevacionog ugla  $x = x(\varphi)$ , onda izraz (1) istovremeno predstavlja i kriterijum optimalnosti.

Sila ukupnog otpora trzanju  $R(x)$ , izražena preko konstitutivnih članova, jednaka je:

$$R(x) = F_k(x, \dot{x}) + F_p(x) + F_{tr} \quad (2)$$

gde je:

$$F_k(x, \dot{x}) = \left[ \frac{C_1}{a^2(x)} + C_2 \right] \dot{x}^2 - \text{sila otpora}$$

HK,

$C_1, C_2$  – konstante koje definišu geometrijske parametre hidraulične kočnice i svojstva hidraulične tečnosti. Njihova vrednost i oblik zavise od tipa i konstruktivnog rešenja hidraulične kočnice,  
 $a(x)$  – površina protočnih otvora u kočnici trzanja,

$\dot{x} = v$  – brzina trzanja cevi,

$x$  – put trzanja (pomak klipa kočnice),

$F_p(x) = F_{po} \left( \frac{H_o}{H_o - x} \right)^k$  – sila otpora povratnika,

$F_{po}$  – početna sila u povratniku,

$H_o$  – svedena dužina gasa u povratniku,

$k$  – koeficijent adijabate gasa u povratniku,

$F_{tr} = F_t(f \cos \varphi + \bar{v})$  – sila ukupnog trenja (u vođicama kolvke i zaptivačima PTU),

$F_t$  – težina trzajuće mase,

$f$  – koeficijent trenja u vođicama kolvke,

$\bar{v}$  – koeficijent trenja u elementima za zaptivanje hidraulične kočnice i povratnika.

Sa ovakvim modelom ukupnog otpora trzanju  $R(x)$ , diferencijalna jednačina kretanja cevi u procesu trzanja ima oblik:

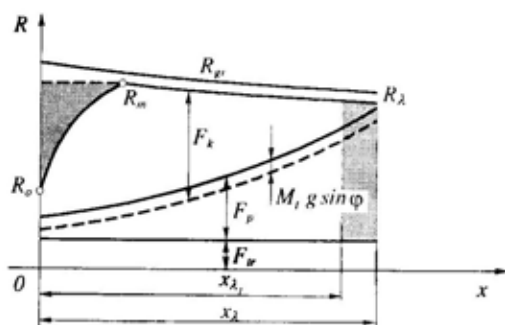
$$M_t \ddot{x} = F_g(t) - R + M_t g \sin \varphi \quad (3)$$

U jednačini kretanja (3) sila trzanja  $F_g(t)$  je nelinearna funkcija vremena i zavisi od balističkih karakteristika kon-

kretnog oruđa. Ako postoji, uticaj gasne kočnice oruđa na veličine sile  $F_g(t)$  u toku perioda isticanja gasova, određuje se izrazom [3]:

$$F_{gk}(t) = \chi F_g(t)$$

gde je  $\chi = \frac{\alpha\beta - 0,5}{\beta - 0,5}$  – impulsna karakteristika gasne kočnice (GK).



Sl. 1 – Sila kočenja trzanja

Koeficijent isticanja gasova  $\beta$  i konstruktivna karakteristika  $\alpha$  GK određuju se poznatim metodama [1, 4].

Pri projektovanju PTU oruđa primenom klasičnog modela proračuna, zakonitost promene sile otpora  $R(x)$  obično se pretpostavlja ili zadaje po periodima trzanja, ali tako da ne pređe dopuštenu (graničnu) silu  $R_m \leq R_{gr}$ , koja se definiše uslovima dinamičke stabilnosti oruđa pri opaljenju (slika 1).

Realizacija promene idealne sile  $R(x) = \text{const.}$  (konstantna sila na putu

trzanja) teško se postiže, jer na nju utiču različiti i brojni parametri [2]. Analiza uticaja nekih od važnijih parametara na promenu sile  $R(x)$  i mogući postupak optimizacije sile  $R(x)$  dati su u [5, 6].

Iz rezultata analize može se zaključiti da se usvojena zakonitost ukupne sile otpora  $R(x)$  može realizovati preko promenljive sile hidraulične kočnice  $F_k(x, \dot{x})$  (slika 1) i da je u tom smislu njen uticaj na ponašanje oruđa dominantan.

Zbog toga je u članku nastojano da se pomoću mehaničkog modela hidraulične kočnice sa kontraklipnjačom odredi uticaj svih relevantnih ulaznih veličina kočnice trzanja na nivo izlaznih parametara, odnosno da se definišu njihove optimalne vrednosti radi efikasnijeg funkcionisanja sistema.

### Programsko rešenje klasičnog modela hidraulične kočnice

Programsko rešenje klasičnog modela rešava diferencijalnu jednačinu kretanja trzajućih delova (3). U proračun je uvedena kriva procene pritiska barutnih gasova  $p(t)$  na dno barutne komore, registrovana merenjem za sve vreme dejstva gasova (uključujući i period isticanja). Za ocenu mehaničkog modela trzanja izabrano je vučno artiljerijsko oruđe kalibra 122 mm, koje ima hidrauličnu kočnicu sa kontraklipnjačom poznate konstrukcije i dimenzija, čija se sila hidrauličnog otpora određuje izrazom [7]:

$$F_k(x, \dot{x}) = \frac{k_1 \cdot \rho}{2} \left[ \left[ \frac{A_t - A_r + b}{a(x) + \sqrt{\frac{k^2}{k} \cdot b}} + 1 \right]^2 (A_t - A_r) + \frac{k_2}{k_1} \frac{A_{tn}^3}{\Omega^2} \right] \cdot v^2 \quad (4)$$

gde je:

$k' = (0,02-0,03) l/\Delta + 1$  – zazor sa lavi-  
rintnim zaptivanjem,

$l$  – dužina zazora  $b$ ,

$\Delta$  – veličina radijalnog zazora,

$A_t = \frac{\pi}{4}(d_k^2 - d_{ks}^2)$  – radna površina klipa  
pri trzanju,

$A_r = \frac{\pi}{4}d_r^2$  – površina otvora regulacionog  
prstena,

$a(x) = \frac{\pi}{4}(d_r^2 - \delta^2)$  – površina promenljivi-  
vog protočnog otvora kočnice trzanja,  
 $k, k_2$  – koeficijenti otpora osnovnom i  
dopunskom proticanju tečnosti u kočnici  
(konstantne promene [5]),

$\rho$  – gustina hidraulične tečnosti (880 kg/  
 $m^3$  za hidraulično ulje HUNT-S),

$v$  – brzina trzanja,

$\Omega = \frac{\pi}{4}(d_{ku}^2 - \delta_{max}^2)$  – površina prstenastog  
zazora između unutrašnjeg prečnika klip-  
njače i maksimalnog prečnika kontraklip-  
njače,

$A_{tn} = \frac{\pi}{4}d_{ku}^2$  – radna površina klipa kočni-  
ce vraćanja,

$b_0 = \frac{\pi}{4}(d_c^2 - d_k^2)$  – površina prstenastog  
zazora između cilindra i klipa hidraulične  
kočnice,

$d_c$  – unutrašnji prečnik cilindra kočnice,

$d_k$  – prečnik klipa,

$d_{ks}$  – prečnik klipnjače,

$d_{ku}$  – unutrašnji prečnik šupljine klipnja-  
če,

$d_r$  – prečnik regulacionog prstena,

$\delta_x$  – prečnik kontraklipnjače kočnice  
(promenljivi).

S obzirom na iznete činjenice, dife-  
rencijalna jednačina kretanja trzajućih

delova u procesu trzanja, za klasičan  
model, može se napisati u obliku:

$$M_t \frac{d^2x}{dt^2} = p(t) \cdot S_{bk} - \left[ F_k(x, \dot{x}) + \right. \\ \left. + F_p(x) + F_{tr} \right] + M_t g \sin \varphi \quad (5)$$

gde je  $S_{bk}$  – površina preseka dna barutne  
komore.

Mehaničko i hidraulično trenje svih  
elemenata je linearizovano i zamenjeno  
konstantnom silom ukupnog trenja  $F_{tr}$  u  
toku trzanja. Nelinearna i nehomogena  
diferencijalna jednačina kretanja drugog  
reda (5) rešena je numeričkom metodom  
Runge Kutta 5. reda, uz korišćenje pro-  
gramskog paketa MATLAB 4.2.c.

U okviru programskog rešenja sači-  
njen je simulacioni model korišćenjem  
programskog modula SIMULINK, za do-  
bijanje rešenja parametara kretanja u  
vremenskom domenu (vremenske funk-  
cije).

Algoritam rešenja klasičnog modela  
prikazan je na slici 2.

Ulaz u simulacioni model je vremen-  
ska funkcija pritiska barutnih gasova u  
cevi oruđa, kao i svi neophodni konstan-  
tni ili poznati promenljivi konstrukcioni  
parametri [8].

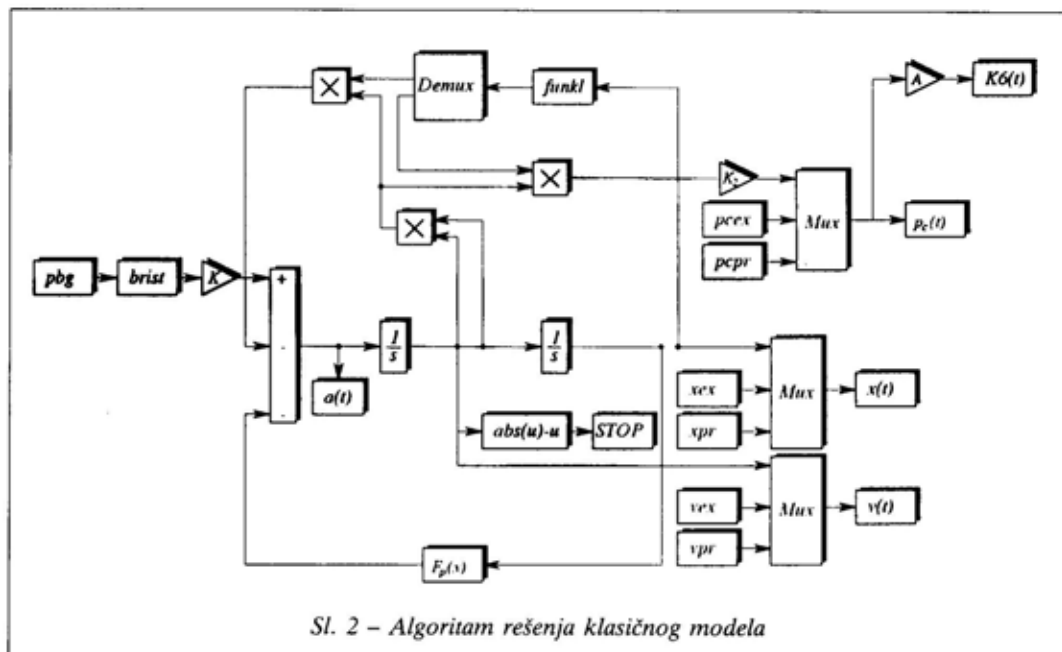
Funkcijski potprogram Funkl za  
svaki prolaz proračunava neophodne pro-  
menljive koeficijente u diferencijalnoj  
jednačini (5). Ulazni parametar u funkcij-  
ski potprogram je pređeni put klipa hi-  
draulične kočnice, a izlazni podaci su  
promenljivi koeficijenti u diferencijalnoj  
jednačini (5).

Izlazni parametri iz simulacionog  
modela su sledeće vremenske funkcije:

$a(t)$  – ubrzanje trzajućih delova (odnosno  
klipa kočnice),

$v(t)$  – brzina trzanja,





Sl. 2 – Algoritam rešenja klasičnog modela

$v_{ex}(t)$  – eksperimentalna kriva brzine trzanja (iz datoteke),  
 $v_{pr}(t)$  – proračunska kriva brzine,  
 $x(t)$  – pređeni put trzajuće mase,  
 $x_{ex}(t)$  – eksperimentalna kriva puta trzanja (iz datoteke eksperimentalnih podataka),  
 $x_{pr}(t)$  – proračunska kriva puta,  
 $p_c(t)$  – kriva pritiska tečnosti u cilindru hidraulične kočnice,  
 $p_{ex}(t)$  – eksperimentalna kriva pritiska tečnosti u cilindru hidraulične kočnice (iz datoteke eksperimentalnih podataka),  
 $p_{pr}(t)$  – proračunska kriva pritiska tečnosti u cilindru hidraulične kočnice,  
 $F_R(t)$  – sila otpora hidraulične kočnice trzanja.

Za uporednu analizu mernih i proračunskih vrednosti parametara kočnice, u programsko rešenje uključene su datoteke vremenskih funkcija eksperimentalnih podataka za pritisak tečnosti u kočnici, brzinu i put trzanja.

Eksperimentalni podaci o dinamičkom ponašanju izabrane hidraulične kočnice trzanja određeni su pri ispitivanju gađanjem [8].

### Osetljivost modela na ulazne parametre

U matematički i programski model uključen je veliki broj ulaznih parametara koji je moguće podeliti u tri grupe:

- konstrukcioni parametri,
- unutrašnjebalistički parametri,
- hidraulični parametri.

Konstrukcioni parametri određeni su na osnovu sklopnog i radioničkih crteža posmatrane konstrukcije. Za proračun se uzimaju njihove nominalne (srednje) vrednosti. U konstrukcione parametre spadaju:

- D – unutrašnji prečnik cilindra hidraulične kočnice,
- d – spoljašnji prečnik klipnjače,

$d_m$  – prečnik klipa moderatora,  
 $l_m$  – dužina klipa moderatora,  
 $b$  – širina kanala u šupljini klipnjače,  
 $d_r$  – unutrašnji prečnik regulacionog prstena,  
 $d_1$  – unutrašnji prečnik šupljine klipnjače,  
 $l_p$  – dužina kontraklipnjače sa promenljivim prečnikom,  
 $l_{p1}$  – dužina kontraklipnjače sa konstantnim prečnikom,  
 $l_{kl}$  – dužina klipa,  
 $d_o$  – prečnik otvora na klipu,  
 $l_o$  – dužina otvora na klipu,  
 $H_o$  – svedena dužina početne zapremine hidropneumatskog povratnika,  
 $F_{p0}$  – početna sila hidropneumatskog povratnika,  
 $b_1$  – širina zaptivača,  
 $h_y(x)$  – dubina kanala u šupljini klipnjače po dužini,  
 $\delta_y(x)$  – prečnik kontraklipnjače po dužini.

Unutrašnjebalistički parametri utiču na ponašanje sistema u početnim vremenskim intervalima, a to su:

$p(t)$  – pritisak barutnih gasova na dno cevi oruđa,  
 $k$  – koeficijent adijabate,  
 $p_u$  – pritisak barutnih gasova na ustima cevi,  
 $t_u$  – vreme kretanja projektila kroz cev oruđa,  
 $\beta$  – parametar isticanja barutnih gasova,  
 $\mu_p$  – masa barutnog punjenja,  
 $m_p$  – masa projektila,  
 $v_0$  – početna brzina projektila.

Hidraulični parametri određuju ponašanje hidraulične tečnosti u procesu trzanja, što se odražava na ukupan otpor hidraulične kočnice. Hidraulični parametri su:

$\rho$  – gustina hidraulične tečnosti,  
 $\eta$  – dinamički viskozitet tečnosti,  
 $\nu$  – kinematski viskozitet tečnosti,

$V_t$  – ukupna zapremina hidraulične tečnosti,  
 $\beta$  – koeficijent stižljivosti tečnosti,  
 $\varepsilon_s$  – koeficijent lokalnog otpora skretanju struje tečnosti udesno,  
 $\varepsilon_{ls}$  – koeficijent lokalnog otpora skretanju struje tečnosti ulevo,  
 $\varepsilon_{ld}$  – koeficijent lokalnog otpora tečnosti pri prolasku kroz difuzor.

Da bi se ispitala osetljivost modela na ulazne parametre neohodno je varirati svaki parametar određeni broj puta u prethodno definisanim granicama i za svaku takvu kombinaciju vrednosti ulaznih parametara analizirati karakteristične izlazne veličine. Da bi se izbegao enormno veliki broj takvih varijacija ulaznih parametara, i da bi se izbegao veliki broj datoteka izlaznih parametara, kroz programski model propuštene su samo kombinacije donjih i gornjih graničnih vrednosti ulaznih parametara. Na taj način moguće je proceniti ponašanje posmatranih izlaznih veličina pri promeni ulaznih, od minimalne do maksimalne vrednosti.

Kod konstrukcionih parametara gornja i donja granica određene su na osnovu vrste i širine tolerantnog polja pripadajuće dimenzije. Kod unutrašnjebalističkih i hidrauličnih parametara granice variranja određene su promenom nominalnih vrednosti za  $\pm 5\%$ .

Granične vrednosti ulaznih parametara, sa kojima je raden proračun, prikazane su u tabeli 2.

Nakon prve serije prolaza može se zaključiti da od 33 ulazna parametra prema tabeli 2, 18 parametara nema veći uticaj na posmatrane izlazne funkcije. Time je broj relevantnih ulaznih parametara znatno smanjen i sveden na parametre čije su oznake:  $D$ ,  $d$ ,  $d_m$ ,  $l_m$ ,  $b$ ,  $d_r$ ,  $d_1$ ,  $l_p$ ,  $l_{p1}$ ,  $h_y(x)$ ,  $\delta_y(x)$ ,  $p(t)$ ,  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_{ls}$ ,  $\varepsilon_{ld}$ .

Granične vrednosti ulaznih parametara

Konstrukcioni parametri			Unutrašnjebalistički parametri			Hidraulični parametri		
Oznaka veličine	Nominalna vrednost (m)	Granične vrednosti (m)	Oznaka veličine	Nominalna vrednost (m)	Granična vrednost (m)	Oznaka veličine	Nominalna vrednost (m)	Granična vrednost (m)
D	0,110	0,1105	p(t)	funkcija vremena	p(t) + 5%	ρ	900	945
		0,1095			p(t) - 5%			855
d	0,062	0,0619	η <sub>pp</sub>	1,20	1,32	η	0,322	0,338
		0,0617			1,08			0,306
d <sub>m</sub>	0,0515	0,0517	p <sub>u</sub>	59,5 · 10 <sup>6</sup>	65,45 · 10 <sup>6</sup>	v	35,5 · 10 <sup>-5</sup>	37,28 · 10 <sup>-5</sup>
		0,0513			53,55 · 10 <sup>6</sup>			33,73 · 10 <sup>-5</sup>
l <sub>m</sub>	0,105	0,115	t <sub>u</sub>	0,0079679	8,366 · 10 <sup>-3</sup>	v <sub>t</sub>	10,3 (l)	10,82
		0,095			7,570 · 10 <sup>-3</sup>			9,79
b	0,010	0,0105	β	1,640	1,722	-β	1/70 · 10 <sup>-11</sup>	0,015 · 10 <sup>-11</sup>
		0,0095			1,56			0,014 · 10 <sup>-11</sup>
d <sub>r</sub>	0,042	0,0422	μ <sub>p</sub>	4,85	5,09	ε <sub>s</sub>	0,88	0,924
		0,0418			4,61			0,836
d <sub>i</sub>	0,052	0,0523	m <sub>p</sub>	21,76	22,85	ε <sub>ls</sub>	0,211	0,222
		0,0520			20,67			0,200
l <sub>p</sub>	0,915	0,916	v <sub>o</sub>	730,0	766,5	ε <sub>ld</sub>	1,34	1,407
		0,914			693,5			1,273
l <sub>pl</sub>	0,188	0,189	<p>v<sub>max</sub> – maksimalna brzina trzanja,  x = x<sub>λ</sub> – ukupna dužina trzanja,  t = t<sub>tr</sub> – ukupno vreme procesa trzanja,  p<sub>c</sub>(p<sub>1max</sub>, p<sub>2min</sub>, p<sub>3max</sub>) – pritisak u cilindru hidraulične kočnice u tri karakteristične tačke.</p> <p>Navedene karakteristike tačke prikazane su na slici 3.</p> <p>Posmatra se procentualna promena navedenih karakterističnih izlaznih veličina za svaku graničnu vrednost odgovarajućeg ulaznog parametra i na osnovu toga zaključuje o uticaju ulaznog parametra.</p> <p>Karakteristični rezultati u ovoj seriji prolaza prikazani su u tabeli 3.</p> <p>Na osnovu dobijenih promena izlaznih veličina u karakterističnim tačkama, pri variranju parametara ulaza, u datom intervalu graničnih vrednosti, nakon druge serije prolaza moguće je izdvojiti sledeće relevantne parametre, čije su oznake: d<sub>m</sub>, d<sub>r</sub>, h<sub>y</sub>(x), δ<sub>y</sub>(x), p(t).</p>					
		0,187						
l <sub>kl</sub>	0,065	0,0656						
		0,0650						
d <sub>o</sub>	0,020	0,025						
		0,015						
l <sub>o</sub>	0,020	0,022						
		0,018						
H <sub>o</sub>	1,686	1,756						
		1,400						
F <sub>po</sub>	16320(N)	17952						
		14688						
b <sub>i</sub>	0,012	0,0132						
		0,0108						
h <sub>y</sub> (x)	funkcija puta	h <sub>y</sub> + 0,0001						
		h <sub>y</sub> - 0,0001						
δ <sub>y</sub> (x)	funkcija puta	δ <sub>y</sub> + 0,0000						
		δ <sub>y</sub> - 0,0001						

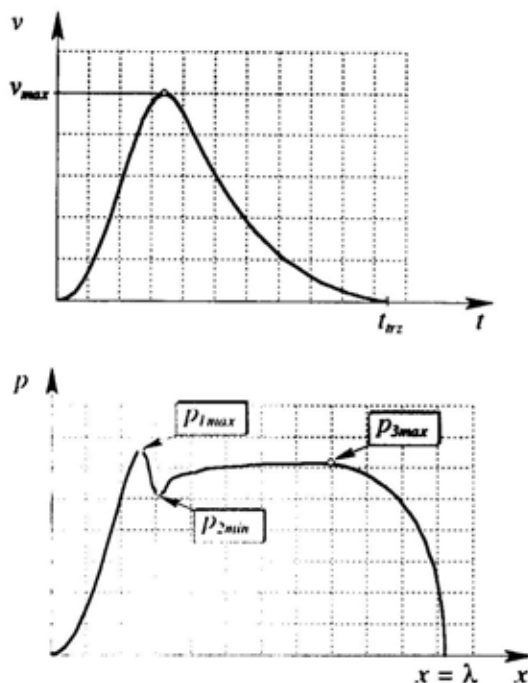
Radi ocene uticaja navedenih parametara analizira se promena bitnih izlaznih veličina u karakterističnim tačkama, tj. u karakterističnim trenucima, a to su:

Karakteristični rezultati proračuna sa graničnim vrednostima relevantnih ulaznih parametara

Red. br.	Oznaka parametra (srednja vrednost)	Granične vrednosti	Izlazne veličine					
			$\Delta v_{\max}(\%)$	$\Delta x_i(\%)$	$\Delta t_{\text{trz}}(\%)$	$\Delta p_{1\max}(\%)$	$\Delta p_{2\min}(\%)$	$\Delta p_{3\max}(\%)$
1.	D (0,110)	0,11015	-0,0033	-0,152	-0,152	0,7599	0,735	-1,99
		0,10985	-0,0399	0,167	0,000	-0,7565	-0,7317	2,387
2.	d (0,062)	0,0619	0,0109	-0,059	0,270	0,285	0,276	-0,788
		0,0617	-0,00079	-0,172	0,271	0,854	0,826	-2,25
3.	d <sub>m</sub> (0,515)	0,0517	-3,782	-1,299	-0,271	2,367	2,157	5,166
		0,0513	3,205	1,359	-1,218	-2,955	-2,644	-4,933
4.	l <sub>m</sub> (0,100)	0,105	0,3152	0,1775	0,00001	0,1763	0,1838	3,612
		0,095	-0,4694	-0,161	-0,00001	-0,1769	-0,1834	-3,169
5.	b (0,010)	0,0105	0,5173	0,1697	0,00001	-0,0353	-0,0635	-0,0377
		0,0095	-0,455	-0,176	-0,00001	0,0352	0,0633	-0,0782
6.	d <sub>r</sub> (0,042)	0,0422	3,5274	1,536	-1,2994	-4,0925	-3,647	1,6748
		0,0418	-3,9976	-1,5727	0,00001	4,333	3,829	-6,247
7.	d <sub>i</sub> (0,052)	0,0523	4,325	1,9763	-1,515	-4,5964	-4,1114	-7,182
		0,0520	0	0	0	0	0	0
8.	l <sub>p</sub> (0,915)	0,916	0,0026	-0,0074	0,00001	0,0315	0,0287	-0,0173
		0,914	-0,0023	0,0075	-0,00001	-0,0312	-0,0283	0,0195
9.	l <sub>pt</sub> (0,120)	0,121	0,0026	-0,0074	0,00001	0,0315	0,0287	-0,0173
		0,119	-0,0023	0,0075	-0,00001	-0,0312	-0,0283	0,0195
10.	h <sub>y</sub> h <sub>y</sub> (x)	h <sub>y</sub> + 0,0001	1,022	0,3535	0,271	-0,100	-0,1737	-0,5604
		h <sub>y</sub> - 0,0001	-1,1093	-0,3200	0,00001	0,0998	0,1723	1,1416
11.	δ <sub>y</sub> δ <sub>y</sub> (x)	δ <sub>y</sub> + 0,0000	0	0	0	0	0	0
		δ <sub>y</sub> - 0,0001	1,757	0,530	-4,873	-1,5739	-1,349	4,065
12.	p = p(t)	p(t) + 5%	5,019	1,779	-1,435	8,156	1,367	2,38
		p(t) - 5%	-5,0213	-1,333	5,414	-7,83	-7,923	-1,094
13.	ε <sub>s</sub> (0,88)	0,968	-0,013	-0,0036	0,00001	0,00003	0,00003	-0,0242
		0,792	0,0131	0,0036	-0,00001	-0,00003	-0,00003	0,0242
14.	ε <sub>is</sub> (0,211)	0,232	0,0801	-0,059	0,27071	0,7761	0,764	-0,803
		0,190	-0,0754	0,0584	0,00001	-0,7768	-0,7648	0,8196
15.	ε <sub>id</sub> (1,34)	1,474	0,4328	-0,3603	0,812	4,941	4,861	-4,59
		1,206	-0,1946	0,4074	-2,166	-4,968	-4,895	5,95
Proračunski rezultati sa srednjim vrednostima ulaza			v <sub>max</sub> = 12,069	x <sub>λ</sub> = λ = 0,9116	t <sub>trz</sub> = 0,1847 s	P <sub>1max</sub> = 95,57 bar	P <sub>2min</sub> = 75,64 bar	P <sub>3max</sub> = 98,9 bar

Može se zaključiti da najveći uticaj imaju vrednosti protočnih površina za osnovna i dopunska proticanja, kao i vrednost pritiska barutnih gasova u cevi oruđa. Uticaj na pritisak barutnih gasova ograničen je i zavisi od unutrašnjebalističkih parametara. Uticaj protočnih po-

vršina na parametre trzanja moguće je ispitati preko uticaja funkcija dubine kanala u šupljini klipnjače h<sub>y</sub>(x), funkcije prečnika kontraklipnjače δ<sub>y</sub>(x), kao i pripadajućih koeficijenata otpora proticanja tečnosti k<sub>1</sub>(x) i k<sub>2</sub>(x).

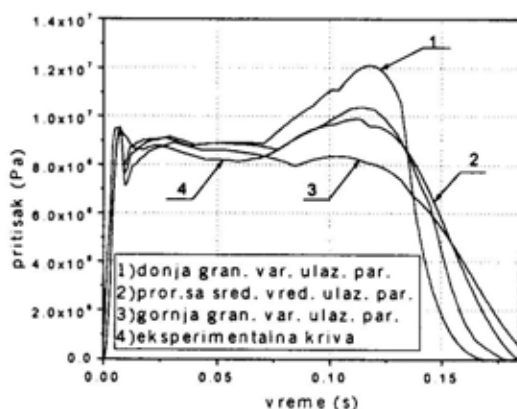


Sl. 3 – Karakteristične tačke za ispitivanje uticaja ulaznih parametara

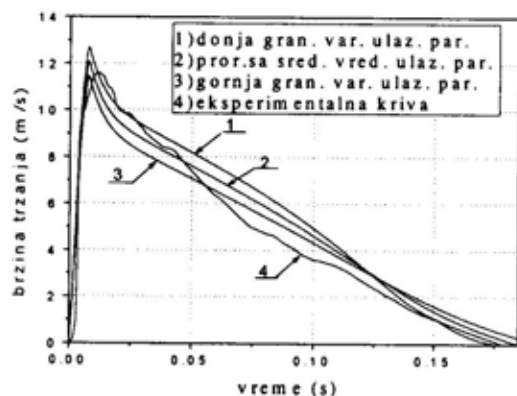
Nakon selekcije relevantnih parametara uzimaju se svi polazni parametri (tabela 3) koji povećavaju izlazne rezultate radi dobijanja gornje granice izlaznih veličina, pri čemu se uzimaju svi polazni parametri sa donjim dozvoljenim nivoom koji smanjuju izlazne rezultate. Na taj način dobija se pojas ili područje izlaznih rezultata proračuna koje je ograničeno parametrima maksimalnog i minimalnog ulaza.

Grafička ilustracija proračunskih veličina, pritiska tečnosti u cilindru kočnice, brzine trzanja i puta trzanja prikazana je na slikama 4, 5 i 6. Takođe, prikazani su i rezultati proračunatih veličina dobijeni testiranjem programskog rešenja teorijsko-numeričkog modela sa srednjim vrednostima ulaznih parametara.

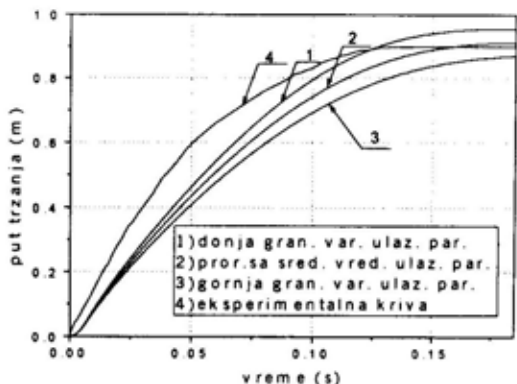
Navedena ideja je realizovana da bi se rezultati proračuna komparirali sa eks-



Sl. 4 – Promena pritiska u cilindru kočnice



Sl. 5 – Promena brzine trzanja



Sl. 6 – Put trzanja u funkciji vremena

perimentalnim rezultatima. Ako je teorijsko-numerički model korektan, svi rezultati eksperimenta bi se morali naći unutar pojasa izlaznih rezultata, ograničenog rezultatima maksimalnog i minimalnog ulaza. Dijagrami toka izlaznih veličina, prema prikazanim slikama, sa izvesnim odstupanjima na pojedinim segmentima za krive pritiska u završnom delu i puta trzanja u početnom delu, pokazuju dobru usaglašenost sa eksperimentalnim rezultatima za oruđe H-122 mm.

S obzirom na to da se dobija relativno širok dijapazon izlaznih rezultata proračuna, može se očekivati slično i za oruđe SO 100 mm.

Iako definisano područje izlaznih rezultata na osnovu dozvoljene gornje i donje granice ulaznih podataka omogućuje brzu i jednostavnu ocenu valjanosti modela i njegovu osetljivost, u konačnom zaključivanju treba biti oprezan. Za veću pouzdanost ocene rezultata nužno je izvođenje faktorskog plana eksperimenta tipa  $2^n$  sa svim kombinacijama variranja ulaznih parametara. Ovakav pristup, s obzirom na veliki broj ulaznih parametara zahtevao bi veliki broj proračunskih prolaza i vreme rada računara, pa zbog toga nije rađen.

### **Određivanje optimalnih vrednosti izlaznih parametara hidraulične kočnice**

Prikazani programski model ima veliki broj ulaznih i izlaznih parametara. Za svaku izlaznu veličinu moguće je dobiti njenu vremensku promenu. Vrlo je značajno posmatrati nekoliko najbitnijih izlaznih veličina kao što su:

$x(t)$  – put trzajućih delova,

$v(t)$  – brzina trzanja trzajućih delova,

$p_1(t)$  – pritisak u cilindru hidraulične kočnice,

$F_k(t)$  – sila otpora kočnice trzanja.

Poznavajući vremenske funkcije promene navedenih izlaznih veličina moguće je analizirati ponašanje sistema sa stanovišta oprimalnog funkcionisanja. Neke od navedenih veličina ( $x$ ,  $v$ ,  $p_1$ ) moguće je odrediti eksperimentalnim putem, radi verifikacije matematičkog i programskog modela. Variranjem vrednosti ulaznih parametara u modelu moguće je ispitati uticaj svakog ulaznog parametra na posmatrane izlazne veličine. U tom smislu moguće je odrediti skup najrelevantnijih ulaznih parametara, odrediti njihov uticaj i analizirati mogućnost poboljšanja posmatrane konstrukcije, s obzirom na izlazne veličine.

Osnovni izlazni parametri koji određuju pravilno i efikasno funkcionisanje sistema su:

– promena pritiska u cilindru hidraulične kočnice,

– vremenska funkcija puta trzanja i ukupna dužina trzanja,

– promena brzine kretanja trzajućih delova,

– ukupno vreme trzanja.

Pri projektovanju artiljerijskih sistema, da bi se dobilo što efikasnije oruđe, neophodno je, pored ostalog, težiti ispunjenju kontradiktornih zahteva da put trzanja i ukupno vreme trzanja budu što kraći, a istovremeno da sile koje deluju na sklopove oruđa budu što manje. Potrebno je definisati takvu kombinaciju ulaznih parametara koja će dati optimalne vrednosti najvažnijih pomenutih izlaznih parametara (tj. minimalnu dužinu i vreme trzanja uz ograničenje u vrednosti maksimalnog pritiska u cilindru hidraulične kočnice). Ograničenje priti-

ska u cilindru hidraulične kočnice neophodno je zbog toga što:

- pritisak u cilindru hidraulične kočnice direktno utiče na silu ukupnog otpora trzanja, odnosno na napadne sile na sklopove i elemente sistema,

- pritisak u cilindru hidraulične kočnice mora biti ograničen usled ograničene otpornosti zidova cilindra hidraulične kočnice, klipnjače i ostalih elemenata hidraulične kočnice.

Pronalaženje optimalnih vrednosti pomenutih izlaznih parametara urađeno je variranjem vrednosti i funkcija relevantnih ulaznih parametara i upoređivanjem dobijenih izlaza za svaki prolaz u programskom modelu.

U programskom modelu za najrelevantnije ulazne parametre odabrani su:

- ukupna površina protočnih otpora u funkciji puta trzanja  $a(x)$ ,

- koeficijent otpora osnovnom proticanju  $k_1$ ,

- koeficijent otpora dopunskom proticanju  $k_2$ .

Kod klasičnog postupka koeficijenti otpora osnovnom i dopunskom proticanju imaju konstantne vrednosti tokom trzanja. U tom smislu, za iznalaženje minimalnih vrednosti puta i vremena trzanja, uz ograničenje maksimalnog pritiska u cilindru hidraulične kočnice, posmatrane su promenljive funkcije površine protočnih otvora i koeficijenata otpora osnovnog i dopunskog proticanja. Za svaku kombinaciju funkcija ulaznih parametara neophodno je rešiti diferencijalnu jednačinu kretanja trzajućih delova u nešto izmenjenom obliku koji glasi:

$$M_t \frac{d^2x}{dt^2} = p(t) \cdot S_{bk} - f(x)v^2(t) - F_p(x)$$

pri čemu su  $F_p(x)$  i  $f(x)$  definisani izrazima prema [1]:

$$F_p(x) = F_{po} \left( \frac{H_o}{H_o - x} \right)^k$$

$$f(x) = \frac{\rho}{2} \left[ k_1(x) \left[ \frac{A_t - A_r + b}{a(x) + \sqrt{\frac{k^2}{k_1(x)} \cdot b}} + 1 \right]^2 (A_t - A_r) + k_2(x) \frac{A_{tn}^3}{\Omega^2} \right] \quad (6)$$

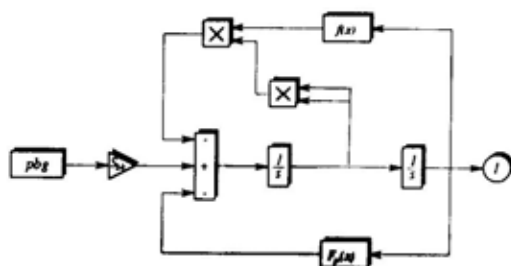
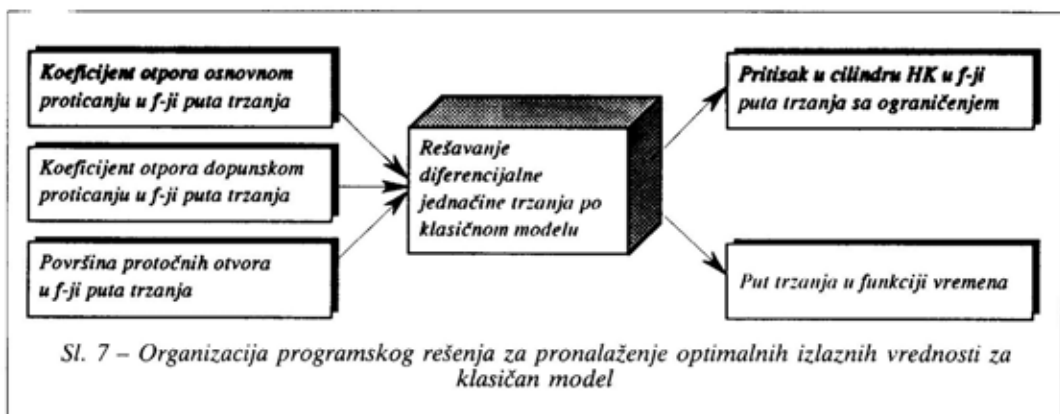
Koeficijenti u izrazu (6) definisani su i objašnjeni u [1].

Pritisak u cilindru hidraulične kočnice definisan je izrazom:

$$p_1(x) = \frac{k_1(x) \cdot \rho}{2} \left[ \frac{A_t - A_r + b}{a(x) + \sqrt{\frac{k^2}{k_1(x)} \cdot b}} + 1 \right]^2 \cdot v^2(x)$$

Organizacija programskog rešenja za iznalaženje optimalnih vrednosti izlaznih parametara prikazana je na slici 7.

Programsko rešenje omogućava interaktivan rad, pri čemu se ulazne funkcije određuju izborom određenog broja ta-



čaka u prethodno definisanim granicama i linearnom interpolacijom i ekstrapolacijom za dobijanje kontinuirane krive. Na taj način moguće je za svaku željenu kombinaciju ulaznih funkcija dobiti izlazne funkcije čijim se upoređivanjem određuju optimalne vrednosti.

Algoritam potprograma za rešavanje diferencijalne jednačine trzanja za pomenuti slučaj prikazan je na slici 8.

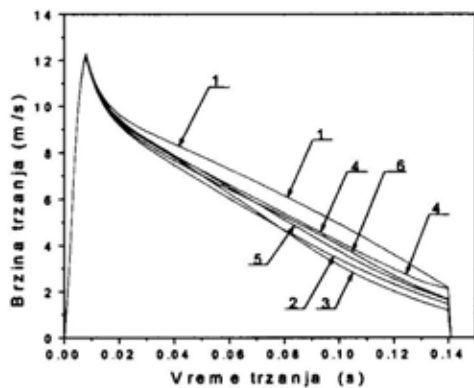
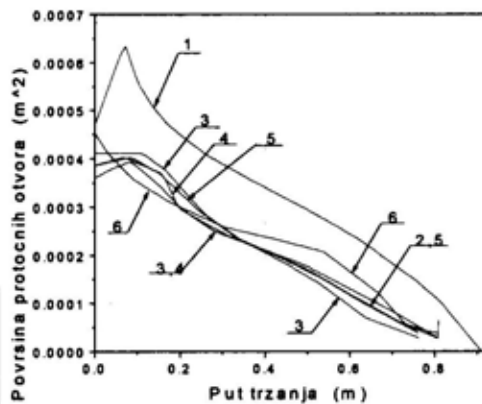
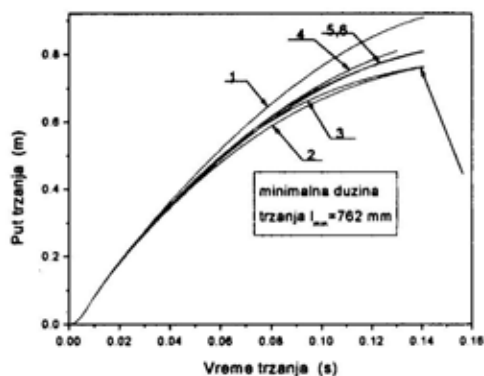
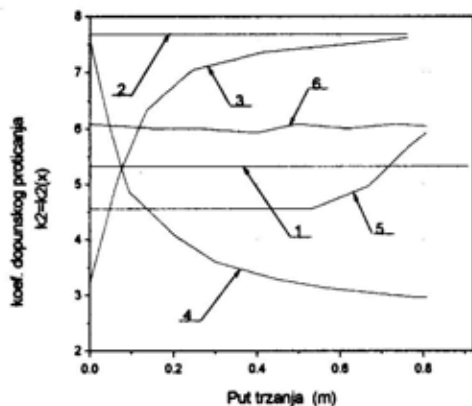
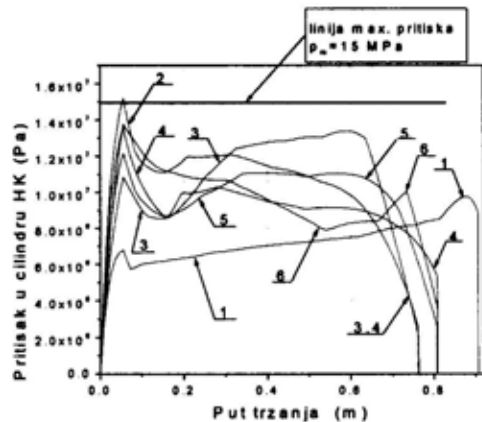
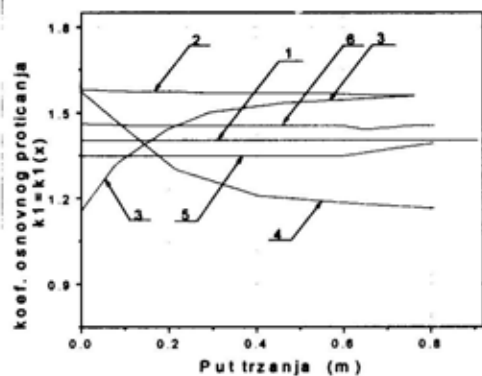
Za pronalaženje optimalnih vrednosti izlaznih parametara za klasičan model hidraulične kočnice za H-122 mm urađeno je 36 prolaza u grupama od po 6 prolaza. Rezultati proračuna za grupu prolaza sa minimalnom dužinom i vremenom trzanja prikazani su na slici 9.

## Zaključak

Minimalna dužina trzanja za H-122 mm po ovom postupku iznosi 762 mm, što je za oko 20% manje od nominalne dužine trzanja ( $\approx 910$  mm). Ograničenje maksimalnog pritiska u cilindru hidraulične kočnice za ovaj proračun je  $p_{\max} = 15$  MPa. Prema tome, kod klasičnog modela hidraulične kočnice na ovaj način moguće je odrediti optimalan oblik promene površine protočnih otvora, da bi se dobile optimalne vrednosti puta, odnosno ukupnog vremena trzanja. Na isti način, jednostavnim doradom prikazanog programskog modela moguće je pronaći optimalne oblike i drugih relevantnih ulaznih parametara za dobijanje željenog izlaza.

Prikazani programski model za dobijanje optimalnih vrednosti karakterističnih izlaznih funkcija naročito je važan u fazi pretprojektovanja artiljerijskih sistema, pri čemu se na pogodan i brz način može odrediti kompletna geometrija (unutrašnja i spoljašnja) elemenata hidroelastičnog sistema, kako bi se dobio optimalan i efikasan rad u procesu opaljenja.





Sl. 9 – Rezultati proračuna za grupu prolaza sa minimalnom dužinom trzanja (6. prolaz)

*Literatura:*

- [1] Toločkov, A.: Teorija lafetov artiljerijskih ustanovok, Oborogniz, Moskva, 1960.
- [2] Rodin, A., Cvjetanski, V.: Dinamičeskie izmerenia v artiljerijskoj praktike, Penza, 1968.
- [3] Orlov, B.: Proektirovanie raketnih i stvolnih sistem, Moskva, 1974.
- [4] Kalezić, M.: Projektovanje vučnih artiljerijskih oruđa – Osnovne karakteristike i dejstvo opaljenja metka na oruđe, VTI Beograd, 1984.
- [5] Kalezić, M.: Optimizacija sile otpora trzanju pri projektovanju PTU art. oruđa, NTP br. 1/92, VTI Beograd, 1992.
- [6] Kalezić, M.: Optimizacija konstrukcije artiljerijskih sistema na bazi fenomena procesa lansiranja projektila, disertacija MF, Beograd, 1993.
- [7] Ristić, Z.: Prilog numeričkoj analizi hidrauličnog sistema za kočenje kretanja cevi oruđa, doktorska disertacija, VTA VJ, Beograd, 1999.
- [8] VTI Beograd: Elaborat br. 24-098; 02-063 Rezultati merenja na oruđima, Beograd, 1981.

**Dr Vlado N. Radić,**  
pukovnik, dipl. inž.  
Uprava za istraživanje, razvoj  
i proizvodnju NVO SMO,  
Beograd

## **ANALIZA DEJSTVA METALNOG DISKA NA OKLOPNA BORBENA VOZILA I MOGUĆNOSTI ZAŠTITE**

UDC: 623.454.361.2-756.6:681.3.06

### *Rezime:*

*U radu se analizira preoblikovanje konkavnog diska realne konfiguracije koji se ugrađuje u protivtenkovsku minu i njegovo dejstvo na oklopno borbena vozilo. Disk je modeliran softverskim paketom DYNA3D primenom trodimenzionalnih konačnih elemenata, a njegovo preoblikovanje pod uticajem eksplozije i produkata detonacije praćeno je kroz vremenske sekvence. U delu softverskog paketa (pretprocesor) INGRID formira se ulazna datoteka za procesor (DYNA3D), a rezultati proračuna interpretiraju se u programu TAURUS (postprocesor). Na osnovu proračuna analizirani su deformacije, maksimalni pritisci, brzine i naponi u čitavom disku.*

*Ključne reči: disk, preoblikovanje, eksplozija, softverski paket, modeliranje, simulacija, jednačina stanja.*

---

## **ANALYSIS OF METAL DISC EFFECTS ON ARMOR VEHICLES AND PROTECTION POSSIBILITIES**

### *Summary:*

*In this paper the deformation of a concave disc in real configuration in an antitank mine is analyzed as well as its effect on armor vehicles. The disc is modeled by three-dimensional finite elements DYNA3D in the software. The deformation of the disc by the influence of detonation products is monitored in time sequences. In the part of software called INGRID (preprocessor) the input data for the DYNA3D processor is formed and the calculation results are interpreted in the TAURUS program (postprocessor). Based on calculations strain, deformation, maximum pressures and velocities are analyzed in the whole disc.*

*Key words: disc, transformation, explosion, software, modeling, simulation, equation of state.*

---

### **Uvod**

Oklopno borbena vozila proizvod je težnje za ofanzivnim i dobro zaštićenim borbenim vozilom velike vatrene moći. Od prve pojave na bojištu, oklopna borbena vozila (prvenstveno tenkovi) predstavljaju jedinstvo vatrene moći, oklopne zaštite i pokretljivosti. Pojavom prvih tenkova nastao je problem kako zaštititi

posadu i osnovne podsisteme oružja u njemu. Naime, metalni oklop trebalo je da spreči prodor projektila streljačke i protivoklopne municije u vozilo. Prva rešenja zasnivala su se na upotrebi čeličnih ploča debljine od 3 do 8 mm.

Razvoj tehnologije uzrokovao je promenu vrste oklopa koji su se primenjivali za zaštitu. Nekada je to bio isključivo čelik, a danas se može govoriti o više različitih vrsta materijala (čelik, legure

aluminijuma, keramika, stakloplastika, kompoziti, reaktivni i aktivni oklopi).

Oklop od aluminijuma koristi se prvenstveno za zaštitu borbenih vozila od dejstva streljačke municije i fragmenata artiljerijskih projektila. Oklop od čelika visoke tvrdoće ima isti nivo zaštite od dejstva pancirne municije 7,62 mm kao i legure aluminijuma. Kombinovanjem tvrdog i žilavog sloja dobija se oklop znatno veće tvrdoće.

Kod lakog oklopa obloženog keramikom spoljni tvrdi sloj (keramika) dezintegriše projektil, a unutrašnji apsorbuje kinetičku energiju. Kombinacija keramike i kevlara ili staklopoliestarske smole koristi se za oklope veće debljine. Modularni oklop predstavlja kombinaciju završenog čeličnog i kompozitnog oklopa, omogućava dopunsku zaštitu i zamenu realizovanog rešenja oklopom boljih zaštitnih svojstava.

U suštini, parametri koji određuju nivo zaštite tenka su, pre svega, oklopna zaštita, a zatim dimenzije (silueta), termička i radarska signatura, pokretljivost, NHB zaštita, protivkumulativni ekrani i protivpožarna zaštita.

Jedno od osnovnih svojstava tenka od kojeg bitno zavisi mogućnost preživljavanja u borbi jeste nivo oklopne zaštite. Većina svetskih proizvođača ne navodi dovoljno pouzdanih podataka o performansama upotrebljenih materijala i zaštitnim svojstvima realizovanih rešenja. Navodi se, uglavnom, da je oklop složen, poboljšan, laminaran ili specijalan. Inače, oklop čini oko 45% ukupne mase tenka. Kod većine savremenih tenkova za zaštitu je primenjen homogeni pancirni čelik koji sadrži ugljenik, mangan, silicijum, nikl, hrom i molibden. Razvoj oklopa na bazi titanijuma počeo je pedesetih godina XX veka, a krajem šezdesetih Britanci su

razvili višeslojni („sendvič“) oklop, tzv. Chobham, koji se sastoji od pancirnog čelika, keramike i aluminijuma. On je omogućavao bolju zaštitu od homogenog čeličnog oklopa. Poslednjih godina istraživači u mnogim zemljama posvećuju veću pažnju razvoju nove klase materijala sposobnih da se fizičkim i hemijskim promenama odupru dejstvu protivoklopnih projektila i mina.

Pojava oklopnih borbenih vozila na bojištu iziskivala je pronalaženje i uvođenje u naoružanje odgovarajućeg efikasnog borbenog sredstva koje bi im se moglo uspešno suprotstaviti. U vojnim doktrinama skoro svih zemalja protivoklopna borba zauzima veoma važno mesto, što proizilazi iz činjenice da su oklopna borbeno sredstva različitih karakteristika, mogućnosti i namene sve brojnija u arsenalima mnogih armija.

Protiv oklopnih borbenih vozila koriste se raznovrsna oružja – od ručnih protivoklopnih bombi, tromblona, protivtenkovskih mina, bestrzajnih topova, do ručnih i prenosnih protivoklopnih vođenih raketa.

### **Protivtenkovske mine**

Protivtenkovske mine spadaju u najmasovnija sredstva za vođenje protivoklopne borbe na bliskim odstojanjima. Pripadaju grupi tzv. pasivnih borbenih sredstava, a koriste se za miniranje puteva i reiona u kojima se očekuje nailazak protivničkih tenkova. Savremene protivtenkovske mine, pored niske proizvodne cene i jednostavne konstrukcije, karakteriše i sve veća upotreba elektronskih elemenata, senzora, prijemnika i predajnika, satnih mehanizama, snažnijih eksploziva, kao i primena specijalnih tehnologija u proizvodnji.

Na bojištu na kojem dominiraju oklopna borbena vozila stvaranje prepreka ima veliku ulogu u svim borbenim planovima. Veštačke prepreke mogu imati različite oblike – kanali, rovovi, betonske konstrukcije, penaste barijere, „klizava sredstva“. Međutim, najuniverzalniji oblik prepreke, koji se najčešće koristi za ojačavanje prirodnih prepreka na bojištu, jesu protivtenkovske mine. Kao protivtenkovsko oružje, protivtenkovske mine, uglavnom, koncentrišu napad na dve bitne komponente tenka – gusenice i podnu ploču.

Gusenice su u neposrednom kontaktu sa zemljištem, i obično su širine od 500 do 700 mm. Podna ploča je relativno male debljine (20 do 30 mm) i udaljena je od zemlje (stand-off distance) 400 do 500 mm. Nijedan od ovih „ciljeva“ danas nije posebno otporan na dejstvo mina. Veći deo oklopa tenka obično je koncipiran tako da zaštiti od dejstva vatre konvencionalnog oružja i zbog toga je maksimalno koncentrisan sa čela, a manje sa strana tela i kupole.

Protivtenkovske mine obično se klasifikuju prema načinu dejstva na tenkove. One koje dejstvuju na gusenice ili točkove borbenog vozila svrstavaju se u protivgusenične mine; one koje dejstvuju samo na pod vozila poznate su kao protivpodne mine, ali one nisu dovoljno snažne da bi presekle gusenice. Postoje i mine koje dejstvuju i na gusenice i na pod tenka (borbenog vozila). One su često protivpodne, ali je korektnije nazvati ih minama za dejstvo čitavom širinom.

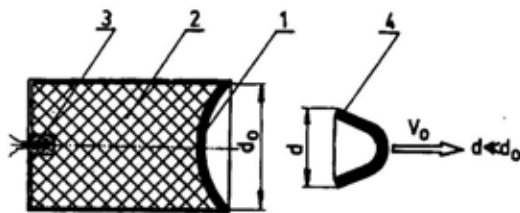
Druga vrsta protivtenkovskih mina koristi se za dejstvo van puta. Postavljaju se sa strane verovatnog pravca nailaska cilja, a deluju kroz oklop tenka (borbenog vozila) pomoću Misznay-Shardinovog ili kumulativnog efekta [1].

Dimenzije većine protivoklopnih mina limitirane su količinom eksploziva koji sadrže (zavisí od mehanizma dejstva) i načinom njihovog postavljanja ili dostavljanja. Razorne mine zahtevaju od 2,5 do 3 kg eksploziva, kako bi sa velikom pouzdanošću uništile gusenice tenka ili šasiju sa točkovima. Mine sa kumulativnim punjenjem mogu imati manju količinu eksploziva. Taj oblik dejstva često se koristi tamo gde mine moraju imati manje dimenzije zbog načina njihovog dostavljanja. One su, međutim, pogodne samo za dejstvo na pod tenkova. Mine na principu Misznay-Shardinovog efekta imaju manju masu eksploziva od razornih mina i mogu biti manje od njih. To će, međutim, smanjiti njihovu sposobnost dejstva na gusenice ili šasije sa točkovima.

### Misznay-Shardinov efekat

Misznay-Shardinov efekat karakteriše se pojavom odbacivanja i preoblikovanja diska koji se nalazi na jednoj strani cilindričnog eksplozivnog punjenja, a inicijacija se vrši sa suprotne strane (slika 1).

Paralelno sa odbacivanjem diska relativno velikom brzinom (nekoliko km/s) dolazi i do njegovog preoblikovanja koje se odražava na izvesno smanjenje prečnika i zakrivljenje diska. Stepenn preoblikovanja ravnog diska nije veliki, a radijus njegove zakrivljenosti približan je radi-



Sl. 1 – Šematski prikaz Misznay-Shardinovog efekta:

1 – disk, 2 – eksploziv, 3 – detonator, 4 – preoblikovani disk

ju detonacionog talasa u trenutku sudara sa diskom. Ako se na čelo eksplozivnog punjenja postavi konkavni disk (kao na slici 1), pri detonaciji eksplozivnog punjenja dolazi do njegovog preoblikovanja sa većim stepenom deformacije u odnosu na ravan disk.

Miszny-Shardinov efekat smatra se graničnim slučajem kumulacije, jer ne dolazi do tečenja materijala obloge i formiranja kumulativnog mlaza, već do odbacivanja diska i preoblikovanja. Slično kumulativnom efektu, Miszny-Shardinov efekat je vrlo složena pojava koju je teško obuhvatiti jedinstvenim matematičkim modelom i na taj način opisati mehanizam preoblikovanja i pronaći parametre kretanja diska. U do sada poznatoj literaturi ne postoji matematički opis ovog fenomena.

Osnovni uslovi za nastajanje Miszny-Shardinovog efekta su konvergencija, tj. koncentracija elementarnih masa diska prema osi simetrije modela koja nastaje usled početne zakrivljenosti diska i relativno veći pritisak gasova u osi punjenja i različiti impuls pritiska koji se saopštava pojedinim elementarnim masama diska.

Na osnovu matematičkih analiza, modeliranja i simulacija, kao i eksperimenata, došlo se do sledećih zaključaka [1]:

- povećavanjem brzine detonacije i zapreminske mase eksplozivnog punjenja povećava se stepen preoblikovanja i brzina diska;

- prečnik eksplozivnog punjenja mora biti jednak, a može biti i veći od prečnika diska (povećavanjem prečnika eksplozivnog punjenja smanjuje se gradijent porasta dužine aktivnog dela punjenja, a time i stepen preoblikovanja diska);

- dužina punjenja utiče, do izvesne granice, na stepen preoblikovanja i početnu brzinu diska;

- smanjenjem radijusa zakrivljenosti diska povećava se gradijent aktivnog dela eksplozivnog punjenja između elementarnih masa, a time i preoblikovanje diska. Povećavanjem radijusa zakrivljenosti diska smanjuje se nagib tangente na disk, zbog čega dolazi do manje koncentracije elementarnih masa diska prema osi simetrije, odnosno do manjeg preoblikovanja diska;

- povećavanjem debljine diska smanjuje se stepen preoblikovanja diska.

### **Numeričko modeliranje i simulacija preoblikovanja diska**

Interakcija metala i eksploziva često se analizira radi uspostavljanja određenih veza između karakteristika materijala i eksploziva. Ta analiza često se izvodi i na realnim konstrukcijama (npr. minsko-eksplozivnim sredstvima). Primena računara tada ima smisla ako se raspolože odgovarajućim setom podataka – o materijalu diska (cilindrična metalna ploča određenih dimenzija i mehaničkih svojstava), o eksplozivu i parametrima jednačine stanja.

U ovom radu učinjen je pokušaj da se na primeru realne konstrukcije mine, koja funkcioniše na principu Miszny-Shardinovog efekta, u 3D geometriji analizira deformacija diska u vremenskom intervalu za koji se pokazalo da verno odražava stanje kretanja i deformacije materijala diska. Do sada je analiza ponašanja diska u kontaktu sa eksplozivom prikazivana u 2D geometriji, što je omogućavalo samo delimičnu sliku stvarnog ponašanja diska. Međutim, u 3D geometriji preoblikovanje diska je mnogo očiglednije, tako da se dobija stvarna slika diska koja se menja od trenutka inicijacije eksploziva do okončanja proračuna.

Za modeliranje diska i simulaciju njegovog preoblikovanja u određenom vremenskom intervalu korišćen je poznati softverski paket DYNA3D. To je, u stvari, eksplicitni trodimenzionalni računarski kod sa konačnim elementima za nelinearnu dinamičku analizu čvrstih tela u 3D geometriji [2–4]. Softverski paket sadrži 15 modela materijala (npr. elastični, elastoplastični, termo-elastoplastični, linearni visokoelastični, izotropno-elastoplastično hidrodinamički, itd.) i 9 jednačina stanja pomoću kojih je moguće izračunati parametre naprezanja i deformacije. U poznatoj američkoj laboratoriji LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) naučnici i istraživači su godinama koristili dvodimenzionalni program DYNA2D. Da bi se uverili u mogućnosti programa DYNA3D ponovili su proračune iz programa DYNA2D u tri dimenzije.

U odnosu na metodologiju modeliranja i zadavanja početnih uslova za proračun u 2D geometriji, modeliranje i simulacija u 3D geometriji potpuno su drugačiji. U ovoj geometriji nema konturnih linija nego se koriste „sektori“. Ulazna datoteka se učitava u preprocesor INGRID i tek tada se može videti da li je model adekvatno geometrijski definisan. Iz INGRID-a se generiše ulazna datoteka za procesor DYNA3D, u kojem se vrši proračun prema zadatim parametrima. Kada se završi proračun sačinjava se ulazna datoteka za postprocesor TAU-RUS, iz kojeg se dobijaju svi potrebni podaci (pritisci, brzine, deformacije, naponi, geometrijski izgled preoblikovanog diska, itd.).

U analizi procesa preoblikovanja diska pod uticajem produkata detonacije eksploziva, te modeliranju i simulaciji za određeni vremenski interval, korišćena

je metoda konačnih elemenata (MKE) sa 3D elementima, a za proračun maksimalnih pritisaka u interakciji metala i eksploziva, kao i brzine kretanja diska korišćena je hidrodinamička teorija i JWL (Jones-Wilkins-Lee) jednačina stanja. Jednačina stanja JWL izabrana je jer se analiziraju fenomeni detonacije i prostiranja udarnih talasa.

U proračunima za eksploziv usvojene su sledeće karakteristike [4, 6]:

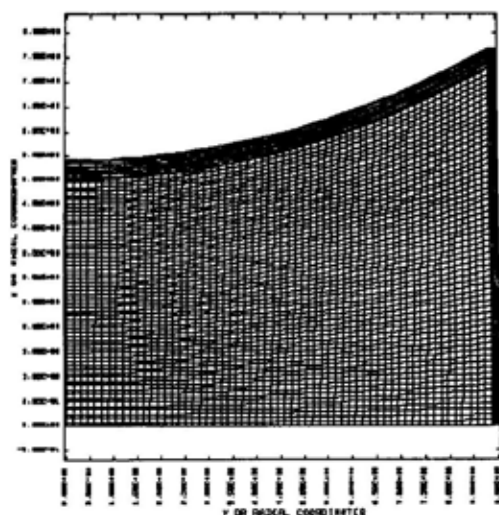
- brzina detonacije ( $D=7900$  m/s)
- parametar C-J ( $p_{CJ}=0,295$  Mbar),
- gustina ( $\rho_e=1,717$  g/cm<sup>3</sup>),
- prečnik ( $d_e = 177$  mm),
- dužina ( $l_e = 73$  mm).

Disk je određen sledećim parametrima u proračunu:

- materijal – čelik,
- prečnik ( $d_d=180$  mm),
- debljina ( $l_d=4$  mm),
- gustina ( $\rho_d=7,83$  g/cm<sup>3</sup>),
- parametar ojačavanja ( $\beta=1$ ),
- modul elastičnosti ( $E=207$  GPa),
- tangenti modul ( $E_T=1$  GPa),
- napon tečenja ( $\sigma_{0,2}=0,2$  GPa),
- Poissonov koeficijent ( $\nu=0,29$ ).

Model koji se sastoji od eksploziva, diska i obloge prikazan je u 2D geometriji (slika 2). Ovakva konfiguracija modela zahtevana je programskim rešenjem (granični i konturni uslovi) u kojem metal uvek mora da bude u kontaktu sa eksplozivom. U analizi i proračunima metalna obloga ima zanemarljivu debljinu i ne posmatra se kao uticajan činilac u prostiranju produkata detonacije i deformacije i preoblikovanja diska.

U softverskom paketu DYNA3D postoji 9 jednačina stanja, od kojih je za proračun maksimalnih i minimalnih pritisaka u modelu, brzina odbacivanja diska, napona i deformacija odabrana poznata jednačina JWL. Ova jednačina stanja te-



Sl. 2 – Model interakcije metal – eksploziv u 2D geometriji

stirana je na modelu u 2D geometriji i pokazala se kao adekvatno rešenje. Takođe, za ovu jednačinu stanja dostupni su potrebni parametri, tako da je moguće proračunati sve veličine. Za ostale jednačine stanja, koje obuhvataju slične fenomene, nisu dostupni svi parametri, pa ih nije moguće koristiti za proračun parametara kretanja i ponašanja diska.

Jednačina stanja JWL definiše pritisak kao funkciju relativne zapremine ( $V$ ) i unutrašnje energije eksploziva ( $E$ ) u obliku:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}$$

gde su:  $\omega$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $E_0$  – ulazni parametri zavisni od vrste materijala i eksploziva.

U proračun su unete sledeće vrednosti parametara:  $\omega=0,34$ ;  $A=5,24229$ ;

$B=0,076783$ ;  $R_1=4,2$ ;  $R_2=1,1$ ;  $E_0=0,085$  [4]. Proračun brzine diska, maksimalnog pritiska i preoblikovanja diska izvršen je u vremenskom intervalu od 0 do 200  $\mu s$ .

Na slikama 3a–3f prikazane su neke sekvence preoblikovanja u kojima je očigledan stepen plastične deformacije početnog oblika diska.

Na osnovu ovih sekvenci može se konstatovati da je plastična deformacija materijala diska vrlo velika, što je potvrđeno i u eksperimentima [8]. Oblik koji poprima disk u eksperimentima i u računarskim simuliranim stanjima istovetan je. Time je dokazana validnost računarskih proračuna i određenih aproksimacija, kao i metodologije izbora modela materijala, jednačine stanja i vrste konačnih elemenata kojima je modelirana interakcija metala i eksploziva.

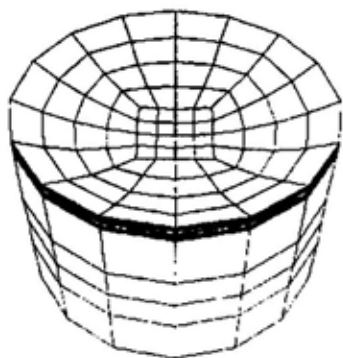
Znajući da je brzina odbacivanja diska velika (reda 2 km/s), može se zaključiti da je i kinetička energija koju disk prenosi na prepreku velika, što obezbeđuje sigurno probijanje (npr. pancirne ploče debljine 20 do 40 mm).

Za interval u kojem je izvršeno simulirano kretanje interakcije metala i eksploziva (0 do 200  $\mu s$ ) dobija se određeni set podataka, od kojih su najinteresantniji konture pritiska i mreža konačnih elemenata (slike 4a–4d).

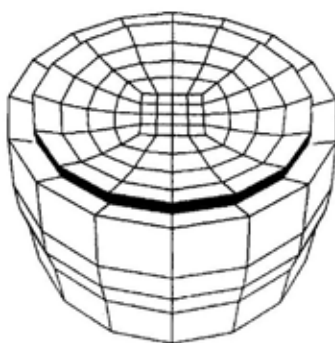
Transformacija početnog konkavnog oblika diska može se pratiti kroz pojedine sekvence, i tada se na najbolji način sagledava sveukupna deformacija jednostavnog oblika diska do svojevrsnog „projektila“ (slike 5a–5e).

Naponsko-deformaciono stanje u preoblikovanom disku teško je opisati postulatima mehanike i dinamike udara, a transformaciju u metalurškom smislu moguće je analizirati samo na realnom sistemu posle eksperimenata [5, 6].

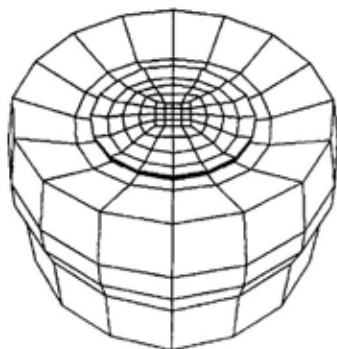




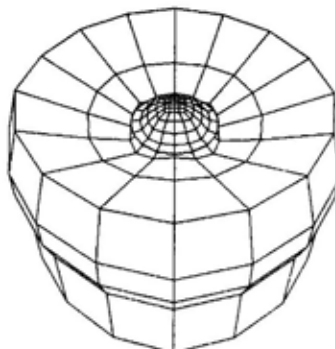
a)  $t = 0 \mu\text{s}$



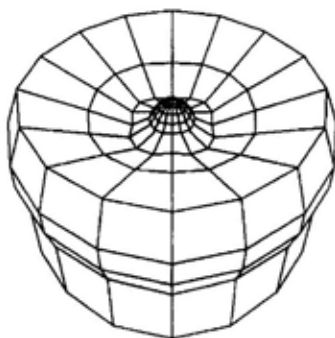
b)  $t = 10 \mu\text{s}$



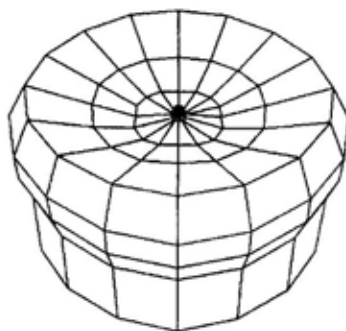
c)  $t = 20 \mu\text{s}$



d)  $t = 40 \mu\text{s}$



e)  $t = 60 \mu\text{s}$



f)  $t = 170 \mu\text{s}$

Sl. 3 - Sekvence preoblikovanja diska

TIME = 0.2000E+02  
 CONTOUR OF PRESSURE  
 MIN = 0.100E+02 IN ELEMENT 100  
 MAX = 0.800E+02 IN ELEMENT 100

CONTOUR VALUES  
 0.100E+02  
 0.200E+02  
 0.300E+02  
 0.400E+02  
 0.500E+02  
 0.600E+02  
 0.700E+02  
 0.800E+02



a)  $t = 20 \mu s$

TIME = 0.4000E+02  
 CONTOUR OF PRESSURE  
 MIN = 0.500E+02 IN ELEMENT 100  
 MAX = 0.800E+02 IN ELEMENT 100

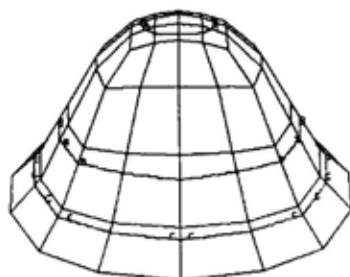
CONTOUR VALUES  
 0.500E+02  
 0.600E+02  
 0.700E+02  
 0.800E+02



b)  $t = 40 \mu s$

TIME = 0.6000E+02  
 CONTOUR OF PRESSURE  
 MIN = 0.710E+02 IN ELEMENT 100  
 MAX = 0.800E+02 IN ELEMENT 100

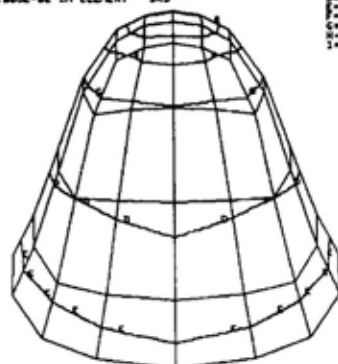
CONTOUR VALUES  
 0.710E+02  
 0.750E+02  
 0.790E+02  
 0.800E+02



c)  $t = 60 \mu s$

TIME = 0.8000E+02  
 CONTOUR OF PRESSURE  
 MIN = 0.800E+02 IN ELEMENT 100  
 MAX = 0.800E+02 IN ELEMENT 100

CONTOUR VALUES  
 0.800E+02



d)  $t = 90 \mu s$

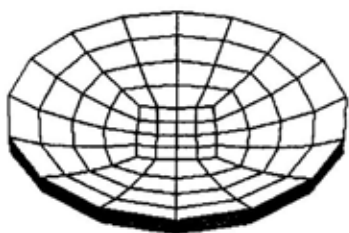
Sl. 4 - Konture pritiska u nekoliko sekvenci simulacije

## Eksperimentalna istraživanja

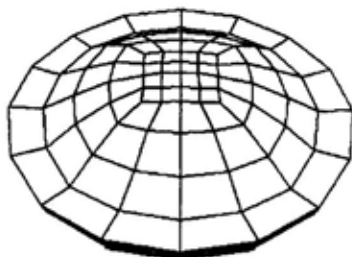
Podna ploča oklopnih borbenih vozila izrađena je od homogenog valjanog čelika i ima visoka mehanička svojstva. Njena debljina, kod najvećeg broja tenkova, iznosi od 20 do 40 mm, što je uslovljeno, pre svega, konstrukcionim i taktičko-tehničkim zahtevima (veća debljina ploče uzrokuje povećanje mase vo-

zila i smanjuje zahtevanu pokretljivost). Takva ploča projektovana je, naravno, da obezbedi i određeni stepen zaštite posadi u vozilu.

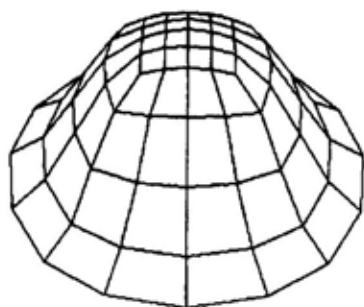
Imajući u vidu da protivtenkovske mine deluju na podnu ploču ili gusenice, da im je uništavajući razorni efekat srazmeran količini eksploziva, materijalu i dimenzijama diska, na realnim pločama ispitivano je dejstvo protivtenkovske mine.



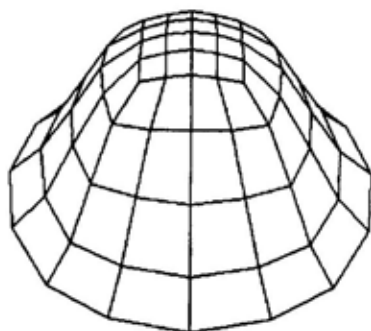
a)  $t = 0 \mu\text{s}$



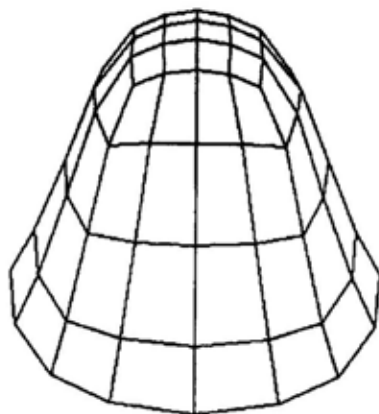
b)  $t = 20 \mu\text{s}$



b)  $t = 40 \mu\text{s}$



c)  $t = 60 \mu\text{s}$



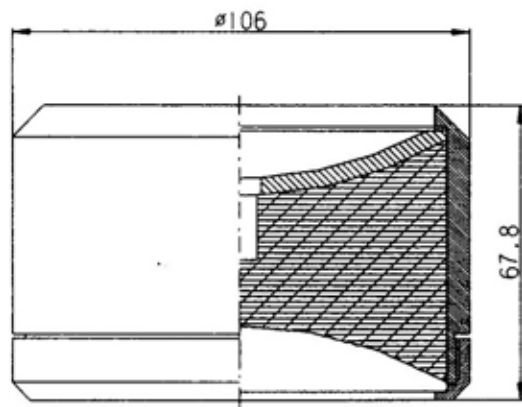
e)  $t = 120 \mu\text{s}$

*Sl. 5 – Transformacija diska po sekvencama*

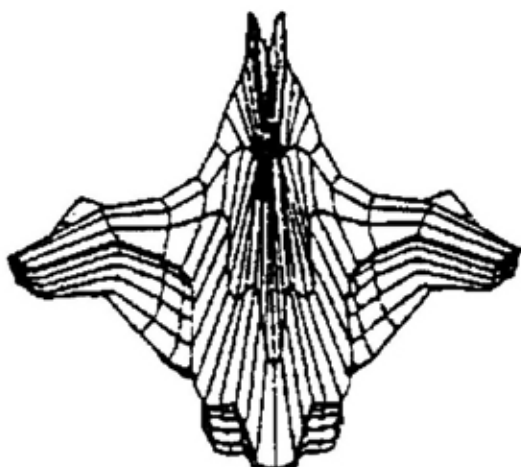
U poređenju sa materijalom podne ploče oklopnih borbenih vozila (tenkova, borbenih vozila pešadije ili oklopnih transportera) materijal diska ima slabija mehanička svojstva. Kada se uzme u obzir da disk tokom preoblikovanja dobija izuzetno veliku brzinu i da raspolaže isto tako velikom kinetičkom energijom, moguće je objasniti zašto se ostvaruje proboj pancirne ploče.

U eksperimentima je korišćen funkcionalni model kasetne protivtenkovske mine (slika 6). Mina je postavljena na zemlju, a ploča na određenom rastojanju (300 do 500 mm). U eksperimentima je korišćen isti model mine, ploče debljine 20 mm, 30 mm i 40 mm, a varirano je i rastojanje mine od ploče. U pogledu efekta dejstva diska na ploču ostvareni su različiti rezultati – od proboja do ispuščenja zadnje površine ploče [8]. Ukupne strukturne deformacije nisu posebno tretirane.

Udarni procesi praćeni velikom brzinom izučavaju se u oblasti hipervelikih brzina, u kojoj velike brzine deformacije imaju odlučujuću ulogu u transformaciji kristalne rešetke i promeni mehaničkih svojstava materijala diska [6]. Navedena



Sl. 6 – Funkcionalni model kasetne protivtenkovske mine



Sl. 7 – Specifičan oblik diska u trenutku udara u prepreku

konstatacija da pri Misznay-Shardinovom efektu ne dolazi do tečenja materijala diska navodi na zaključak da je u svojevrsnom obliku „projektila“ (slika 7) koncentrisana izuzetno velika energija, čija aplikacija na prepreku dovodi do probojnog dejstva i karakteristične pojave za takve procese (ulazni otvor, probijeni deo i izlazni otvor). Rezultati eksperimenata [8] potvrdili su ovu konstataciju, a realni oblik „projektila“ iz eksperimenata



Sl. 8 – Realan izgled preoblikovanog diska („projektila“)



$t = 200 \mu s$



$t = 160 \mu s$



$t = 120 \mu s$



$t = 80 \mu s$



$t = 40 \mu s$



$t = 0 \mu s$

Sl. 9 – Proces preoblikovanja diska po izabranim sekvencama

prikazan je na slici 8. Čitav proces preoblikovanja, po nekim sekvencama, prikazan je za interval 0–200  $\mu s$  na slici 9.

### Zaštita oklopnih vozila od dejstva mina

Priroda i područje opasnosti od mina znatno su promenjeni poslednjih godina.

Kao posledica toga, oklopna borbena vozila postala su osetljivija i ukazala se potreba da se poboljša njihova zaštita od većine protivtenkovskih mina koje se nalaze u upotrebi. Privremeno izbacivanje tenka, npr. iz borbe, znači stvaranje povoljnih uslova za njegovo uništenje drugim vatrenim sistemima. Tenk sa oštećenom gusenicom na otvorenom zemljištu je otkrivena meta, što u taktičkom smislu nije zanemarljivo (slika 10).

Generalno gledano oštećenje šasije oklopnih borbenih vozila točkaša od dejstva mina prihvaćeno je kao neminovno. Mere preduzimane protiv protivtenkovskih mina sastojale su se, uglavnom, od različitih oblika razminiranja sa ciljem da se izbegne ili smanji rizik od oštećenja. Međutim, na poboljšanje zaštite tela oklopnih borbenih vozila od eksplozije protivtenkovskih mina usmereni su veliki istraživački resursi.

Mere za zaštitu tenkova od stvarnog kontakta sa minama sastoje se u postavljanju oklopnih ploča ispod trupa koje su dovoljne debljine da izdrže eksploziju mina. To uslovljava primenu ploča manje debljine nego što su bočne stranice tenka i prednjih ploča izrađenih od mekšeg i mnogo elastičnijeg čelika radi smanjenja rizika od proboja.

Ma koja debljina donjih ploča da se primeni, to donosi veliku korist, naročito zbog smanjenja rizika od proboja i letalnih efekata usled dejstva natpritiska unutar borbenog vozila. Da bi se što više smanjio rizik od oštećenja, bočne ploče na britanskim tenkovima Centurion, Chieftain i ostalima nagnute su pod uglom od 12° prema unutrašnjosti. Donje ploče kod tenkova T-54 i kasnijih modela ruski stručnjaci oblikuju iz jednog dela i zavaruju samo po bočnim stranama. Koncept MEXAS (Modular Expandable Armor



*Sl. 10 – Oštećenje tenka od dejstva protivtenkovske mine*

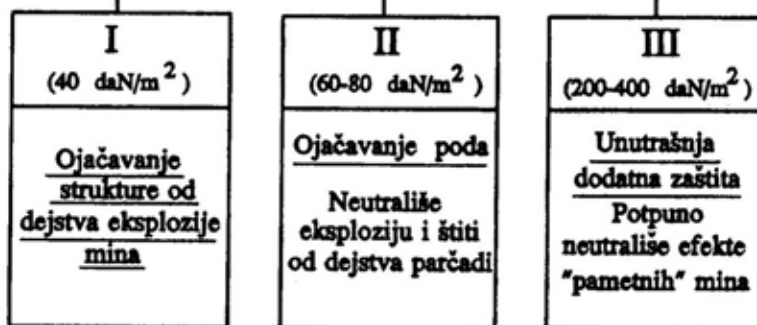
System), koji nudi nemačka firma IBD Diesenothe Engineering (slika 11), odražava trenutni nivo zaštite od mina na oklopnim borbenim vozilima. Čak iako su relativno tanke, donje ploče treba da imaju što veću krutost kako bi se smanjio štetan uticaj natpritisaka. Kao primer može poslužiti britanski tenk Chieftain, na kojem je donja ploča u obliku plitkog slova V, a čija je krutost znatna. Sličan efekat postigli su izraelski stručnjaci na tenkovima Merkava, koji imaju V oblik donje ploče, koji je oblikovan savijanjem jedne umesto zavarivanja dve ploče. To poskupljuje tenk, ali eliminiše osetljivost zavarenih spojeva.

Ruski konstruktori koriste alternativni put ukrućenja donjih ploča tenkova – od tenka T-62 pa nadalje. To podrazumeva izradu ploča sa poprečnim žlebovima umesto ravne i glatke površine, koja je pogodnija jer lakše klizi preko blata (kala, gliba), mekog zemljišta i savlađuje prepreke. Nasuprot tome, proizvodnja relativno velikih ploča debljine 20 mm talasastog oblika znatno je skuplja.

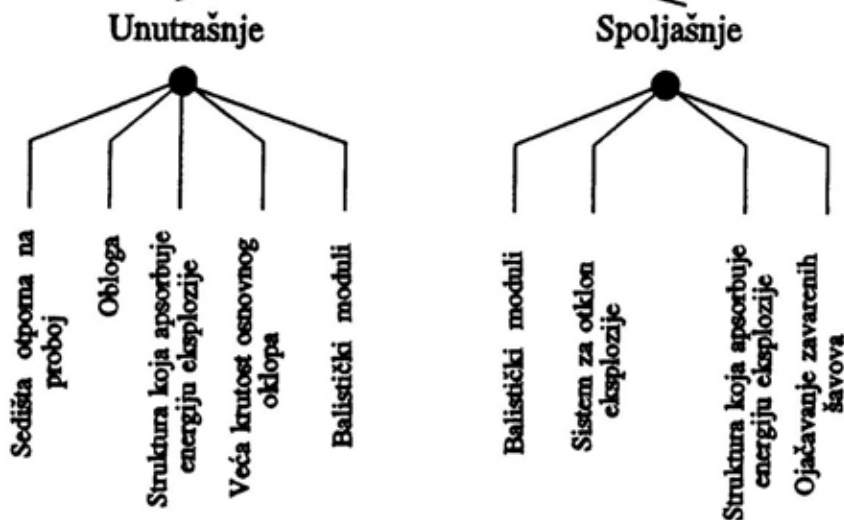
Kako opasnost od mina postaje sve veća i ne podrazumeva samo eksploziju ispod gusenica nego i ispod poda tenka, ruski konstruktori su dodavanjem potpornih nosača ukrutili prednji deo donjih ploča. To je urađeno na tenkovima T-54 AM i T-62M tokom 1983. godine, a kasnije je primenjeno i na ostale tenkove, uključujući i T-80U. Tenkovi T-54AM i T-62M opremljeni su razmaknutim pločama, čineći tako dvostruki pod, mada na račun smanjenja klirensa. Međutim, takav način povećanja zaštite tenkova od eksplozije mina nije primenjen na tenkovima T-72M1 i T-80U, kao i najnovijem T-90.

U Izraelu je na tenku Merkava od početka proizvodnje ugrađivan razmaknuti oklop na dodatnim donjim pločama veće debljine. Rastojanje između dve ploče bilo je u početku iskorišćeno za rezervoare za gorivo, ali je to na tenku Merkava 3 izostavljeno, jer je dokazano da je vazduh efikasniji od tečnosti (goriva) u slabljenju udarnog talasa generisanog eksplozijom mine.

# NIVOI ZAŠTITE



# PREDUZETE MERE



Sl. 11 – Koncept zaštite MEXAS

Godinama se oklopna borbeno vozila suočavaju sa opasnostima koje izazivaju mine. Odgovor usvojen u konstruk-

ciji oklopnih borbenih vozila mase veće od 10 tona okarakterisan je na primeru oklopnog transportera Saracen, koji se

koristi u britanskoj armiji. Tom 6-točkaškom vozilu su sa donje strane dodate čelične ploče debljine 12 mm, kako bi izdržalo eksploziju mine sa masom eksploziva od 9 kg ispod jednog od točkova.

Opasnost nije ograničena samo na eksploziju mine. Laka oklopna borbena vozila i tenkovi mogu se suočiti i sa kumulativnim punjenjima ili sa minama na principu Misznay-Shardin. One neće otkinuti samo gusenicu ili uništiti točkove, već će perforirati oklop debljine 50 do 70 mm na distanci koja odgovara klirensu oklopnih vozila.

Za zaštitu tenkova od dejstva takvih mina zahteva se ugradnja ekstraoklopnih ploča debljine 70 mm, koje imaju masu skoro 5 tona. To može, eventualno, biti prikladno rešenje za specijalna inženjerska vozila, ali ostala oklopna vozila zahtevaju drugačiji pristup. Ako je zaštita od mina ograničena na odeljenje posade, masa ekstraoklopa mora se smanjivati, naročito ako je on sofisticiranijeg tipa od običnog čeličnog oklopa. Takav pristup prihvatila je nemačka kompanija Krauss-Maffay u razvoju višenamenskog transporta ATF, koji je balistički minski zaštićeno vozilo.

Želja da se što više smanji broj žrtava stavlja u prvi plan zaštitu članova posade univerzalnih i specijalnih vozila. Kamioni i inženjerska vozila opremljeni su oklopom koji efikasno štiti od dejstva malokalibarskih zrna i fragmenata, uključujući i one od mina Claymore. U mnogim slučajevima ta poboljšanja ili modernizacije podrazumevaju dodatni oklop za zaštitu od mina koje eksplodiraju ispod vozila. Iako takva rešenja povećavaju preživljavanje posade, ona ne mogu da obezbede nivo zaštite poput vozila namenski projektovanih da budu otporna na dejstvo mina. Prema mišljenju stručnjaka iz juž-

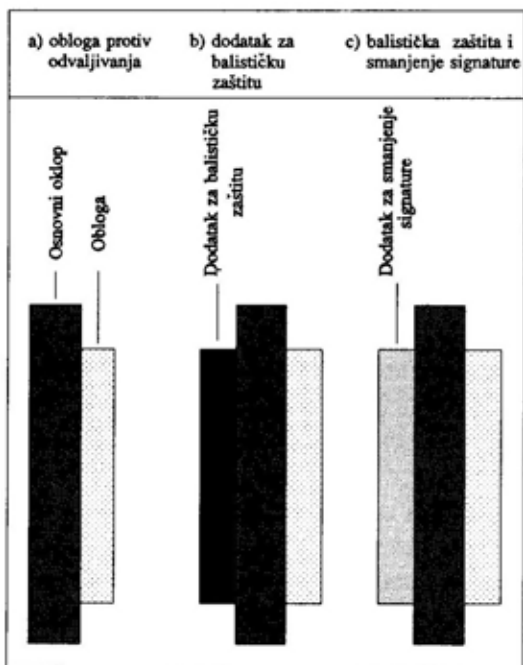
noafričke odbrambene organizacije ARMSCOR, efikasna minska zaštita zahteva nekoliko komplementarnih prilaza, koji, pored ostalog, uključuju:

- otklon (skretanje) eksplozije i njenu apsorpciju,
- zaštitu od penetracije,
- obezbeđenje adekvatne visine vozila iznad tačke eksplozije,
- obezbeđenje dovoljne i pravilno raspoređene mase (za stabilizaciju vozila),
- ugradnju sigurnih i bezbednih sedišta za posadu,
- zaštitu vitalnih komponenti i tereta,
- izvođenje kvalitetne obuke.

Obezbeđenje zaštite oklopnog borbenog vozila od dejstva mina ojačavanjem poda (patosa) zavarenim oklopnim čeličnim pločama može samo parcijalno da štiti strukturu, ali to ne smanjuje efekat detonacije mine na posadu, instalacije i uređaje u unutrašnjosti vozila. Velika buka, udar, pritisak i sekundarni fragmenti ostaju kao opasnost. Elastična deformacija poda prouzrokuje da se sklopovi i agregati, montirani ili postavljeni na dnu borbenog odeljenja, usmeravaju u projektile brzinom od 300 m/s. Otuda ovaj pristup ne vodi rešenju problema i ne donosi željene rezultate.

Radi razvijanja efikasne zaštite od mina potrebno je jasno definisati koji se standardi moraju stvarno ispuniti. Nije dovoljno samo izbegavati perforaciju poda (patosa). Minska zaštita mora biti projektovana tako da pruži efikasnu zaštitu od efekata tradicionalnih razornih mina sa sadržajem 15 kg TNT, protiv mina sa eksplozijom oblikovanim projektilima sa više od 7 kg TNT, kao i od dejstva mina usmerenog dejstva. U slučaju kumulativnih mina njihova efika-





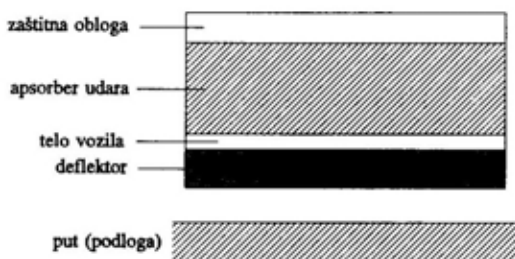
Sl. 12 – Šema hibridne minske zaštite

snost mora se smanjiti za najmanje 75%. Ispitivanja u nemačkoj kompaniji IBD koja su se odnosila na hibridnu minsku zaštitnu šemu integrisanu u eksperimentalno vozilo i tenk Leopard 1, pokazala su da ti zahtevi mogu biti ispunjeni (slika 12).

Kompletna minska zaštita odnosi se na pokrivanje celokupne dužine vozila i dela bočnih stranica. Zavareni šavovi u patosu moraju se zaštititi kosim (nagnutim) pločama, kako bi se sprečilo probijanje prouzrokovano strukturnim promenama susednih šavova. Pod vozila mora da ima nekoliko slojeva od različitih materijala, sposobnih da efikasno apsorbiraju buku i udarne talase. Ekstremno velika tvrdoća ploča mora da obezbedi da se udarni talas prenese na strukturu poda kako ne bi prouzrokovao odvajanje opreme i pomoćnih uređaja. Pomeranje poda prema unutrašnjosti vozila zbog

elastične deformacije ne sme preći više od 150 mm, a usled plastične deformacije ne sme biti veće od 50 mm. Funkcija zaštite mora se sačuvati čak i pri višestrukim detonacijama. Otvori u podu tenka, ukoliko se ne mogu izbeći, moraju se proračunati i tako ojačati da onemogućuje dejstvo projektila prema unutrašnjosti vozila.

U rešavanju visokih zahteva oklopne zaštite hibridni sistemi, koji su integrisani unutar i spolja osnovnog oklopa, optimalno su rešenje. Spoljni čvrsti deflektor (otklonski sistem), koji se dodaje na osnovni oklop, usmeren je na defokusiranje koncentrisane energije detonacije. Preko osnovne oklopne zaštite preostala energija ulazi u kombinovani sistem sa dinamički nelinearnim elementima i na taj način se redukuju apsorbovanjem. Jedan deo takvog apsorpcionog sistema jesu vrlo krute komponente male gustine. Prema borbenom odeljenju tenka obloge apsorbiraju udar i na taj način kompletiraju zaštitni sistem (slika 13).



Sl. 13 – Apsorpcioni sistem za eliminisanje efekata dejstva protivtenkovske mine na oklopno vozilo

## Zaključak

Oklopna borbena vozila, posebno tenkovi, „ranjivi“ su na dejstvo protivtenkovskih mina. Materijal diska ima slabija mehanička svojstva od podne ploče, ali sa velikom brzinom odbacivanja i veli-

kom kinetičkom energijom deluje razorno na ploču. Dimenzije ploče limitirane su taktičko-tehničkim zahtevima, posebno manjom masom i većom pokretljivošću. Pošto disk ima specifičan oblik, primeren već poznatim principima preoblikovanja, njegova transformacija pod dejstvom produkata detonacije je očigledna.

U radu su upoređeni rezultati eksperimentalnih istraživanja sa numerički modeliranim i simuliranim dejstvom diska na metalnu ploču. Numeričke simulacije odvijaju se sa karakterističnim problemima zbog tendencije da se proračunska mreža interakcije disk – ploča prekine, tj. dovede do neregularnosti u proračunima.

Na realnom modelu (dimenzije diska i eksplozivnog punjenja su iz postojeće konstrukcije mine) izvršeno je računarsko modeliranje i simulacija kretanja diska u intervalu od 0 do 200  $\mu$ s. Za razliku od postojećih modela i ostvarenih simulacija u 2D geometriji, ova analiza izvršena je prvi put u 3D geometriji. Očiglednost transformacije konkavnog diska u ovakvom obliku nije sporna, kao što nije sporna činjenica da je ovakva simulacija vrlo bliska realnom stanju u eksperimentalnim istraživanjima. Dobijeni rezultati proračuna ohrabruju i navode na mogućnost smanjenja broja potrebnih eksperimenata, ukoliko se raspolaže odgovarajućim setom podataka o materijalu, eksplozivu i parametrima jednačine stanja. Rutina u generisanju konkretnih modela, odgovarajući softverski i hardverski zahtevi i neprekidna veza model – eksperiment, obezbediće da validnost dobijenih rezultata proračuna bude na visokom nivou.

Sigurno je da računarsko modeliranje i simulacija, posebno u 3D geometriji,

imaju smisla, čak se mogu izvesti i za različite materijale (aluminijum, bakar). Tada je uz teorijske postulate, matematičke analize i eksperimentalnu verifikaciju rezultata modeliranja i simulacija moguće ispravno zaključivati u oblasti velikih brzina deformacije. Pored izuzetno velike baze podataka o različitim parametrima materijala i eksploziva, osnovni doprinos računarskog modeliranja i kasnijih simulacija jeste postizanje što veće tačnosti proračuna. To se postiže dugotrajnim radom, ne samo u delu softvera, nego i u detaljnim eksperimentima i njihovoj verifikaciji u realnim borbenim sredstvima. Naravno, tačnost proračuna odražava se i na mogućnost optimizacije konstrukcije protivtenkovskih sredstava.

Iz analize se vidi da protivtenkovska mina sigurno probija podnu ploču tenka, a iz načina na koji se to ostvaruje (u statičkim i u realnim uslovima) očigledno je da se proboj ne može u potpunosti sprečiti. Međutim, novije modifikacije oklopnih borbenih vozila uključuju različite načine kojima se smanjuje efekat dejstva protivtenkovskih mina. Jedan od njih je postavljanje dodatne pancirne ploče ispod postojeće, a drugi je postavljanje ploča pod određenim uglom, tako da se eliminiše direktno dejstvo mine na podnu ploču.

Ove mere se primenjuju na postojećim konstrukcijama, a u novim konstrukcijama to se realizuje dopunskim ojačanjima, poprečnim gredama, podizanjem podne ploče na viši nivo, pomeranjem sedišta iz centra i delimičnim smanjenjem direktnog dejstva mine, ojačavanjem ugradnjom modularnih ploča (keramika, kompoziti, višeslojni čelični oklop), ili primenom hibridnih sistema sa velikim faktorom zaštite.

*Literatura:*

- [1] Radić, V.: Minsko ratovanje. Monografija, Vojnoizdavački zavod, Beograd, 2001.
- [2] Hallquist, J. O.: User's Manual for DYNA3D, University of California, 1979.
- [3] Hallquist, J. O.: Theoretical Manual for DYNA3D, University of California, 1982.
- [4] Hallquist, J. O.: A Procedure for the Solution of Finite Deformation Contact-Impact Problems by the Finite Element Method, University of California, 1982.
- [5] Dobratz, B. M.: LLNL Explosives Handbook, University of California, 1981.
- [6] Zukas, J. A.: Impact Dynamics, New York, John Wiley & Sons, 1982.
- [7] Radić, V.: Numerička simulacija kretanja i brzine ploča pri zavarivanju eksplozijom, 21. Kongres teorijske i primenjene mehanike, YUMEX, Niš, 1995, 106-111.
- [8] Radić, V., Momirović, V.: Ispitivanje probojnosti funkcionalnih modela kasetne protivtenkovske mine KPTM-2, stručni izveštaj VTI-02-01-0616, 2000.
- [9] Radić, V.: Modeliranje i simulacija odziva materijala na dejstvo eksplozije, Naučnotehnički pregled, 4, 1998, 48-57.
- [10] Radić, V.: Penetracija projektila velikom brzinom u oklop velike debljine, Naučnotehnički pregled, 4-5, 2000, 18-24.

**Rezime:**

*U ovom radu razmatrani su uticaji savremenih trendova u konstrukciji i ekoloških zahteva na uslove rada savremenih ulja u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem. U razvoju motora SUS i dalje se potenciraju konstrukcije sa smanjenim dimenzijama i sa visokim stepenom mehaničke i toplotne korisnosti. Povećanje izlazne snage kamionskih dizel motora se nastavlja. Istovremeno, postavljaju se zahtevi za daljim povećanjem pouzdanosti i veka upotrebe. Dodatno, radi ograničenja emisije, zahteva se nizak nivo potrošnje ulja (0,5 g/kWh i niže), čak i za natpunjene motore. Sve to znači da se mogu očekivati izuzetno visoka termička opterećenja. Trend u smanjenju upotrebe maziva pojavio se u razvijenim zemljama ranih devedesetih godina. To nije iznenađenje, s obzirom na to da je ekotoksikološki udar maziva veoma veliki problem, ako se uzme u obzir veza između ulja i životne sredine. Zato se intenzivno radi na razvoju novih principa podmazivanja zasnovanih na novim sredstvima za podmazivanje, kao i na novim materijalima tarnih parova.*

*Ključne reči: motor SUS, tribologija, motorno ulje, ekologija.*

---

**INFLUENCE OF IC ENGINE TRIBOLOGY ON FRICTION  
REDUCTION AND ECOLOGY**

**Summary:**

*Influences of up-to-date design trends and ecology requirements on working conditions of actual lubricants in internal combustion engines were considered in the paper. Designs with reduced dimensions and designs with high thermal and mechanical efficiency are favoured in IC engine development. The increase of diesel engine break power for commercial trucks is continuing. At the same time, requirements for further increase of reliability and lifetime are established. Additionally, demands for further emission reduction require low oil consumption (0,5 g/kWh and lower), even for charging diesel engines. All this implies that very high thermal loads can be expected. The trend of the lubricant use decrease appeared in developed countries in the early 1990s. This is not surprising, because the ecotoxicological impact of lubricants became a big problem. Thus, an intensive research for new principles of lubrication, based on new lubricants and new friction materials, is in progress.*

*Key words: ic engine, tribology, engine lubricants, ecology.*

---

**Uvod**

Očekuje se da smanjenje potrošnje goriva i ostalih naftnih derivata u transportnoj industriji, primarno bude pod-

ržno daljim promenama u hardveru, inovacijama u konstrukciji i povećanjem intervala održavanja. Na poboljšanje ekonomičnosti vozila može se uticati, pored ostalog, i izborom goriva i maziva [1].

U razvoju motora SUS i dalje se potenciraju konstrukcije sa smanjenim dimenzijama i sa visokim stepenom mehaničke i toplotne korisnosti. To vodi, pored ostalog, i ka značajnom povećanju opterećenja kliznih ležajeva. Posledica velikih opterećenja ležajeva je još veće smanjivanje zazora između ležaja i rukavca, odnosno smanjenje uljnog filma, što dovodi do nemogućnosti hidrodinamičkog podmazivanja (potpunog razdvajanja rukavca i ležaja) u svim režimima rada motora [2].

Povećanje izlazne snage kamionskih dizel motora se nastavlja. Istovremeno, postavljaju se zahtevi za dalje povećanje pouzdanosti i vek upotrebe. Dodatno, radi ograničenja emisije zahteva se nizak nivo potrošnje ulja (0,5 g/kWh i niže), čak i za natpunjene motore. Sve to znači da se mogu očekivati izuzetno visoka termička opterećenja [3].

Mada su istraživače okupirali, uglavnom, pokušaji poboljšanja radnog ciklusa, ipak su ostale još dve važne oblasti: kvalitet podmazivanja i analiza trenja, što je detaljnije obrađeno u literaturi [4].

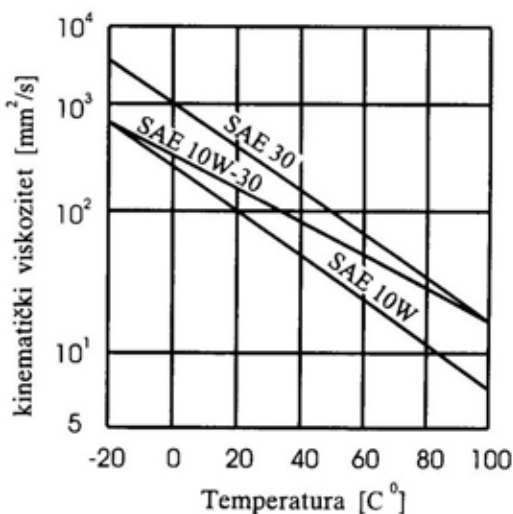
### Kvalitet podmazivanja

Formulacija podmazivanja prolazila je kroz različite faze. Početkom XX veka za kvalitet podmazivanja presudno je bilo poreklo baznog ulja, da bi kasnije sve više bio određivan paketom aditiva. Trend povećanja paketa aditiva nastavljen je da bi u novije vreme pojedina brodska ulja bila najekstremniji primer ulja koja imaju sposobnost apsorbovanja produkata sagorevanja, kontrole habanja, ispiranja motora, oksidacione i termičke stabilnosti, izdvajanja vode i zaštite od korozije.

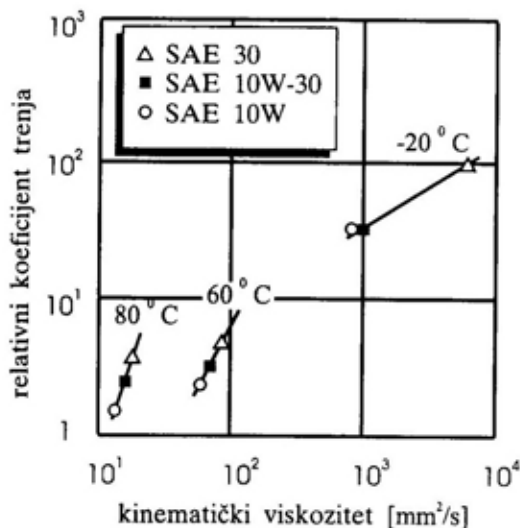
Podstaknuta su mnogobrojna fundamentalna istraživanja trenja i podmazivanja, koja su uticala na usavršavanje eksperimentalnih i analitičkih tehnika, tako da sad postoji mogućnost da se postigne značajan napredak u radu motora, a da se ne mora obavezno poboljšavati proces sagorevanja.

Naftne krize skrenule su pažnju na tradicionalne aditive, kao što je ZDIP (Zinc dialkyl dithio phosphate) i to ne samo na njihova antikorozijska svojstva, nego i na njihovo dejstvo kao mogućih opštih modifikatora trenja u kombinaciji sa molibdenom i sličnim komponentama. Odnos između viskoziteta i koeficijenta trenja bio je pravilno shvaćen još tridesetih godina XX veka, međutim koncentrisanje na problem smanjenja trenja u vreme naftnih kriza dovelo je do ideje da se pokuša sa poboljšivačima indeksa viskoziteta u kombinaciji sa modifikatorima trenja, radi ostvarenja smanjenja potrošnje goriva.

Karakteristika viskoziteta monogradnih ulja SAE 10W i SAE 30, koja sadrže poboljšivač indeksa viskoziteta, prikazana je na slici 1 [5].



Sl. 1 – Karakteristike viskoziteta motornih ulja



Sl. 2 – Efekat multigradnog ulja na gubitke viskoznoeg trenja

Krivulja odgovarajućeg koeficijenta trenja u odnosu na viskozitet na slici 2 pokazuje kako multigradno ulje (koje pokazuje u poređenju sa uljem 10W-30 smanjenje ekvivalentnog viskoziteta za oko 1 gradaciju na srednjim temperaturama), dopušta smanjenje gubitaka usled viskoznoeg trenja za oko 20% [5].

Svakako da različiti kompleksi aditiva imaju različite posledice na gubitke usled trenja pri graničnim ili hidrodinamičkim uslovima podmazivanja i pri različitim temperaturnim uslovima u motoru.

Da bi se ispitalo kako nova formulacija ulja utiče na potrošnju goriva, potrebno je koristiti različite merne tehnike.

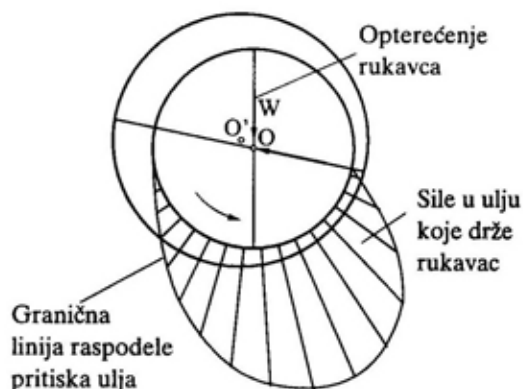
Ekološki i politički pokreti zahtevaju izbacivanje aditiva na bazi teških metala, pa proizvođači maziva moraju da razviju nov sistem mehanizama delovanja aditiva u kontroli habanja i prevenciji korozije [6].

Tribološka nauka, koja je postala posebna disciplina 1966. godine, i čiji je

utemeljivač Jost Report (Jost Report), razmatra podmazivanje i habanje.

Problemi koji su posebno važni u današnje vreme jesu izučavanje habanja sistema razvoda, kombinovano sa visokim radnim temperaturama i mnogim drugim oštrim uslovima, kao i razvoj maziva po sistemu „punjenje za ceo radni vek“. Takođe, tu su i mnogobrojni propisi vezani za emisiju, zahtevi za visokim stepenom korisnosti, kao i manjom potrošnjom goriva. Tribologija zauzima centralno mesto u izboru svih ovih varijanti. Osnov teme postavio je Osborn Reynolds još pre jednog veka, u radu u kojem je publikovao jednačinu koja formira osnov teorije hidrodinamičkog podmazivanja. Jedna od prvih primena Reynoldsove jednačine bilo je objašnjenje procesa koji dozvoljava da ležaj nosi opterećenje, a koji se zasniva na pritisku koji se formira u ležaju, u prisustvu ulja (slika 3). Izučavanje karakteristika kliznog ležaja još uvek je bazirano na Reynoldsovoj jednačini, ali uz upotrebu savremenih računarskih tehnika, što se i dalje nastavlja.

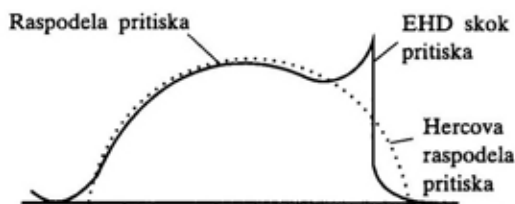
Sledeće veliko poboljšanje u teoriji podmazivanja predstavljao je razvoj elasto-hidrodinamičkog (EHD) podmazivanja, specijalnog slučaja hidrodinamičkog



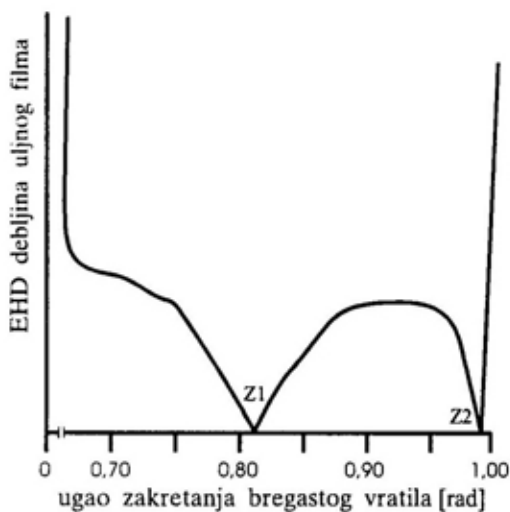
Sl. 3 – Raspodela pritiska u kliznom ležaju

podmazivanja (HD), kod kojeg je uticaj delova ležaja na debljinu uljnog filma relativno veliki, a time je velika i promena u raspodeli opterećenja između kontaktnih površina. EHD teorija je neophodna za razumevanje podmazivanja kugličnih i valjkastih ležajeva, bregova i klackalica, zuba zupčanika i klipnih prstenova. Teorijska raspodela opterećenja između valjka i nosača u valjkastom ležaju, prikazana je na slici 4 [6]. Slična raspodela je u svim jako opterećenim tačkastim ili linijskim kontaktima. Najupečatljivija karakteristika EHD teorije je ekstremno tanak uljni film. Valjkasti ležajevi mogu da rade sasvim zadovoljavajuće sa debljinom uljnog filma mnogo manjom od  $1 \mu\text{m}$ , dok debljina uljnog filma od  $10 \mu\text{m}$  može da se smatra izuzetno velikom.

Preporuka je data za rešavanje problema podmazivanja bregastog vratila automobilskog motora sa jednokrakom klackalicom, što se često primenjuje radi poboljšanja u konstrukciji komore za sagorevanje kod oto motora. Na slici 5 prikazana je teorijska debljina uljnog filma kao tačka kontakta između brega i klackalice u funkciji površine klackalice [6]. Treba istaći da je debljina mnogo manja od  $1 \mu\text{m}$ , a u jednoj tački teorijski pada na nulu. To je u oblasti tzv. nulte zahvatne brzine, pri kojoj površine brega i klackalice putuju jednakom brzinom, ali u suprotnim smerovima u odnosu na



Sl. 4 - Raspodela pritiska i zazora u EHD kontaktu



Sl. 5 - Teorijska debljina uljnog filma između brega i klackalice

tačku kontakta. Pri nehidrodinamičkom podmazivanju može da se postavi pitanje kako mehanizam funkcioniše, a da ne dolazi do katastrofalnog razaranja kontaktnih površina, što predstavlja drugu važnu oblast u teoriji tribologije, a to je hemija aditiva, udružena sa delovanjem ulja. Današnja ulja ne mogu se osloniti samo na osobine baznog ulja. Poneki kontakt između površina je neizbežan, i mora da bude podeljen sa drugim tačkama pomoću efekata hidrodinamike. Da ne bi došlo do oštećenja površina pod ovim uslovima, sva ulja za automobilske motore sadrže aditive, opisane kao protivhabajuće, koji rade na principu reakcije sa kontaktnom površinom, stvarajući površinske slojeve koji imaju malu smicajnu čvrstoću što prouzrokuje smanjenje trenja. Formiranje zaštitnih filmova zavisi od temperaturnih uslova, tako da mnogi aditivi imaju strogo definisano temperaturno područje u kojem su efikasni. Uspesna mešavina aditiva treba da obezbedi zaštitu u najširem temperaturnom području i mora da bude kompatibilna sa

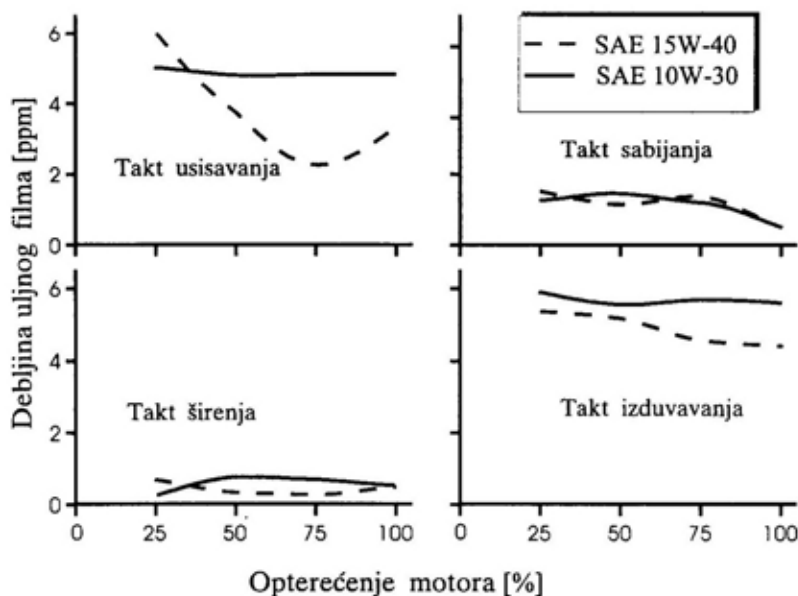
baznim uljem, čak i pri kritičnim zahtevima.

Postoji niz radova o ponašanju motornih ulja, sa posebnom preporukom protiv habanja brega i klackalice. Uglavnom se koristi tehnika merenja zasnovana na električnom otporu, čime se proučava reakcija filma u simuliranom kontaktu breg – klackalica. Mnoge aktivnosti triboloških u ispitnim laboratorijama uljnih kompanija posvećene su razvoju sve efikasnijih aditiva za rad u uslovima graničnog podmazivanja. Zadatak se sve teže ispunjava, jer su velike razlike u uslovima rada, a zahtevi su da jedno ulje zadovolji sve uslove. Treba reći da su uslovi rada koji se sreću u sklopu breg – klackalica, sasvim različiti od onih koji se sreću između klipnog prstena i cilindra. Izučavanje uslova koji postoje kod današnjih motora, veliki je izazov za eksperimentalnu veštinu triboloških, pa su razvijeni

i mnogi sofisticirani metodi. To uključuje merenje debljine uljnog filma pomoću električno-kapacitivne tehnike, merenje temperatura površine klipnog prstena pomoću infracrvenog zračenja, skupljanje uzoraka ulja iza klipnih prstenova i blizu gornjeg dela cilindra, i merenje intenziteta habanja, uz korišćenje ozračivanja delova.

Kao primer rezultata koji se mogu postići, na slici 6 je prikazana debljina uljnog filma između gornjeg prstena i cilindra. Ova debljina merena je u blizini SMT kod velikog turbo dizel motora, pri broju obrtaja koji odgovara maksimumu obrtnog momenta [6].

Postoji velika razlika u debljini filma u različitim taktovima, kao i jedan uočljiv prekid za vreme sagorevanja. Uočeno je da ulje SAE 10W-30 daje bolju zaštitu od SAE 15W-40. Razlog je bolji dotok prvog ulja do kritičnih oblasti, što je potvrđeno



Sli. 6 – Debljina uljnog filma ispod kompresionog prstena kod turbo dizel motora



i manjim intenzitetom trošenja hroma sa površine prstena, i aluminijuma sa klipa u prvom slučaju. Takođe, u ovom motoru je intenzitet trošenja bio osetljiv na viskozitet ulja. Poznati fenomen poliranja cilindra kod dizel motora doneo je dodatne probleme. Formirana je površina cilindra slična ogledalu, koja je tako glatka da ulje klizi, ne može da se zadrži na površini cilindra, što dovodi do ozbiljnog oštećenja. Smatra se da je proces poliranja mehanički proces u kojem tvrde čestice ugljenika (čadi), formirane u komori sagorevanja, deluju kao sredstvo za poliranje [6].

### **Ekološki zahtevi u odnosu na podmazivanje motora**

Usled ekoloških i ekonomskih pritiska trendovi su da se koriste ulja nižeg viskoziteta i u oto i u dizel motorima. Sa smanjenjem viskoziteta ulja, povećava se broj mesta na kojima nestaje hidrodinamički režim podmazivanja, a pojavljuje se mešoviti (granični) režim. Kada dolazi do ovoga, povećavaju se gubici trenja, a može da nastane habanje. Zbog toga je sadašnji izazov formulirati ulja koja imaju najniži mogući viskozitet, bez stvaranja problema sa habanjem u širokom spektru konstrukcija motora [7].

Do sada su motori razvijani uvek sa povećanim performansama (svakako uz ograničenje cene), ali ovaj trend dolazi u sukob sa zahtevima za očuvanjem okoline (bilo direktno ili indirektno), jer upotreba maziva mora da bude izrazito smanjena.

Trend u smanjenju upotrebe maziva pojavio se u razvijenim zemljama ranih devedesetih godina, a u Nemačkoj je, na primer, i konkretizovan donošenjem od-

govarajućih zakonskih propisa '95. i '96. godine.

Ove aktivnosti, kao i smanjena cena ispitne opreme, dovode do obimnijih istraživanja u pogledu razvoja motora sa smanjenom potrošnjom ulja (radi smanjenja količine čestica u izduvnoj emisiji), kao i razvoja motora sa povećanim intervalom zamene ulja. To bi, na primer, dovelo do smanjenja cene motornih ulja za oko 25% do 2005. godine.

Nije iznenađenje da je ekotoksikološki udar maziva veoma veliki problem, ako se uzme u obzir veza između ulja i životne sredine. Primera radi, u Nemačkoj od prodane količine ulja, od preko 1 100 000 t godišnje, 530 000 (47%) ostane nereciklirano. Od te količine za 200 000–350 000 t ulja i hidrauličnih tečnosti godišnje ne zna se dalja sudbina [7]. Ako se uzme u obzir da je Nemačka relativno primerna zemlja po pitanju upotrebe i rukovanja uljima i hidrauličnim tečnostima, onda je uz svetski promet od oko 38 000 000 t godišnje više nego jasan značaj ovog problema. Zbog toga u današnje vreme industrija ulja sve više podržava biološki brzodegradirajuća ulja, formiranjem imidža u proizvodnji pratećih proizvoda za automobilsku industriju.

Kupci zahtevaju čistu i humanu okolinu, i nivo zakonodavstva koji će podržati povećanje prometa i forsiranje kampanja za razvoj bioloških brzodegradirajućih proizvoda, kao što su motorna i transmisiona ulja, koja generalno ne dolaze iz petrohemijske industrije.

Izvor za visokobiološka, brzodegradirajuća ulja nalazi se u osnovnoj hemijskoj industriji ulja. Biološka degradacija, na primer u odnosu na EP/AV aditive (aditivi za ekstremne pritiske), mora značajno da se poboljša ili supstituiše prirodnim supstancama. U Nemačkoj su granice

za ukupan sadržaj netoksičnih aditiva za hidraulične tečnosti 5% zapreminski, a uz to i biodegradibilnost svakog posebnog aditiva mora da bude veća od 20%. Da bi se ispunili zakonski propisi, ekološka zamena može da se traži u novim tribološkim materijalima, ako njihova tribologija ne zahteva EP/AV aditive [7].

Biološka degradibilnost EP/AV aditiva nije bitna kada se ovo sredstvo koristi u formulaciji ulja. Takođe, tribološka potrošnja EP/AV aditiva ne zahteva zamenu ulja, kada oni nisu pomešani sa uljima. Tribosistem (podmazivanje) za njih nema nikakav značaj. Takvi ciljevi će zahtevati nove formulacije, kao i nova bazna ulja.

Lako je uočiti da prelaz sa fiksnih intervala zamene ulja na jednokratno podmazivanje tokom radnog veka motora ne može da obezbedi samo industrija ulja. Naime, postoji ideja da se podmazivanje kliznih površina preimenuje u tribosistem. Taj cilj može da se ostvari samo ako je konstrukcija kompatibilna sa materijalom i dobrim funkcionisanjem maziva, a ne kao u prošlosti, kada su maziva upotrebljavana nezavisno od primenjenog materijala. Za to mora da se uradi jedinstveni proračun. Jedan prosečan motor sa dvofunkcionalnim fluidom (podmazivanje i hlađenje) sadrži 14 l fluida i može da izgubi oko 5 l curenjem ili sagorevanjem, što znači da za ukupno pređenih 200 000 km treba nadoknaditi gubitak fluida od samo 0,025 l/1000 km [7].

#### *Ograničenja u podmazivanju tečnostima*

U EHD režimu podmazivanja postoji mogućnost postojanja ograničenja u pogledu reologije ili kidanja uljnog filma. Poslednjih godina postoji trend u uglača-

vanju površina i smanjenju napajanja uljem, što iziskuje smanjenje debljine uljnog filma na 100 nm i rezultira nenjutnovskom reakcijom u procesu podmazivanja. Ove debljine filma nisu tipične samo za mikromehaničke komponente i kompjutersku tehnologiju, već će u budućnosti biti aktuelne i u automobilske tehnici.

Filmovi od samo nekoliko molekularnih slojeva su čvrsti pri visokim pritiscima (u mikrokontaktu), ukoliko se u granicama od 0,5 GPa do približno 2,2 GPa ulja mogu transformisati u staklaste čvrste čestice. Za vreme kidanja filma ulje se podvrgava promeni iz laminarnog u turbulentno strujanje. Danas je u tehnologiji podmazivanja reprezentativno mešanje baznih ulja i polimernih poboljšivača indeksa viskoziteta. Lako se dolazi do zaključka da reološko ponašanje ulja u tribokontaktu zavisi od poboljšivača indeksa viskoznosti, pošto se debljina filma približava veličini molekula poboljšivača. Uz to, količina i veličina čestica usled habanja mora znatno da se smanji, što zahteva uljni film u svojim fizičkim granicama, a klasične veze moraju da budu ponovo određene [7].

#### *Uloga materijala*

Konstruktori motora razmatraju mogućnost da smanje količinu ulja koja se predaje tribosistemu, kao i debljinu uljnog filma, što će povećati udeo mešovitog graničnog podmazivanja i suvog trenja, a posledica će biti povećan nivo trenja i habanja. Nadalje, kidanje nenjutnovskog filma iziskuje više gornje regione površina, zbog čega sve veći značaj poprima topografija površina i nauka o materijalima, za tribološke karakteristike tribosistema.

Na osnovu ovog i prethodnih stavova može da se postavi pitanje: zašto mešati ulja sa potrošnim EP/AV aditivima, ako:

- mogu da se predvide, u novim konstrukcijama, tribomaterijali otporni na habanje;

- funkcionisanje EP/AV aditiva do- vodi do stvaranja reaktivnih slojeva na površini;

- može da se omogući strategijski pravac u podmazivanju sa upotrebom male količine odgovarajućeg ulja ili se radi o podmazivanju bez ulja;

- tribosistemi sa podmazivanjem produžavaju period do granične istroše- nosti.

Povećanje otpora na habanje formiranjem tribooksida u reaktivnim slojevima može, bez sumnje, da se meri pomoću određene ispitne opreme, ali je teško izvesti odgovarajuću analizu na osnovu savremenih metoda analize. Zbog toga još uvek nema pouzdanih saznanja o stabilnim reaktivnim slojevima. Zamenjena mehanizma podmazivanja, koji se zasniva na dodavanju EP/AV aditiva u ulje pri mešovitom graničnom podmazivanju, mehanizmom podmazivanja koji se zasniva na samoformiranju EP/AV efekta, reakcijom sa površinskim slojem materijala otpornog na habanje u budućnosti će predstavljati pravi doprinos u razvoju biološki-degradirajućih ulja, i u povećanju intervala zamene ulja sve do jednokratnog podmazivanja tokom celog veka upotrebe, bez bilo kakvih gubitaka u tribološkim karakteristikama. To, takođe, otvara put za upotrebu i drugih fluida na uljnom osnovu, kao što su poliester, sintetički ester, poliglikoli [7].

Pri ovakvom scenariju tribološko značenje reči mazivo svešće se na pojam radni fluid. Neka istraživanja su podigla nivo znanja, a nakon toga se transformi-

sala u prototipove, čiji se detalji mogu naći u patentnoj literaturi i časopisima. Ipak, da bi se realizovali u proizvodnji, zahtevaju još velike napore.

### *Koncepti motora bazirani na novim materijalima*

Pre 20 godina širom sveta su inicirani programi za razvoj motora bez podmazivanja i motora sa alternativnim podmazivanjem. Glavne poteškoće su bile obuhvaćene konceptima kao što su adijabatski motori, motori sa podeljenom termostrukturom (Isuzuov motor), stirling-motori, dvotaktni motori i motori na vodonik, kao i tribologija složenih sistema, posebno tribologija sklopa klipni prsten – cilindarska košuljica. Čak ni ovi koncepti, udruženi sa kvalitetnim materijalima i kvalitetnim prevlakama, ne mogu da postignu niske koeficijente trenja i nivo habanja kao što je to kod tribosistema baziranim na podmazivanju uljem, što se primenjuje u konvencionalnim motorima. Ovaj zaključak važi za sadašnje stanje, i još su daleko od šire primene motori poput, na primer, pomenutog Isuzuovog motora. Kompanije koje razvijaju motore bez podmazivanja u ovom trenutku fokusiraju svoju pažnju na produženje perioda zamene ulja. Termin „bez ulja“ može da podrazumeva nekoliko mogućih definicija [7]:

- bez ulja – za kupca (tj. jednokratno punjenje uljem u toku veka upotrebe motora);

- bezuljni rad (tj. suv, nepodmazivan);

- upotreba tečnog maziva različitog od upotrebe ulja naftnog porekla.

Isuzuov motor kombinuje tradicionalne podmazujuće tribosisteme i termostrukturu u obliku keramičkog motora.

Struktura je podeljena na taj način što gornji deo cilindarske košuljice radi na visokoj temperaturi, a niži deo na mnogo umerenijim temperaturama, pri čemu su smanjeni tribološki problemi. Zbog toga je upotrebljen visokootporni silicijum-nitrid sa slabom toplotnom provodljivošću i silicijum-nitrid sa mnogo boljom sposobnošću kvašenja uljem. Klipni prstenovi i niži deo cilindarske košuljice su izrađeni od sinterovanog  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , pomoću gasa pod pritiskom, a koji sadrži i  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Na osnovu podataka ove firme, ovaj koncept keramičkog motora se podmazuje poliestrom koji sadrži malu količinu aditiva, što obećava dobre rezultate.

Glavni deo adijabatskog motora sastoji se od hibridnog klipa sa kompresionim prstenom koji se podmazuje čvrstim mazivom na radnoj temperaturi od  $540^\circ\text{C}$  i sa uljnim prstenom koji se podmazuje hidrodinamički, pomoću sintetičkog poliestera-maziva za visoke temperature. Inženjeri koji se bave adijabatskim motorima očekuju da će visokotemperaturni tribološki sistemi biti operativni oko 2008. godine.

Najnoviji primenjeni Fordov patent izlaže nanošenje raspršivanjem niskofriktionog metalnog oksida (Mej 0), čime se stvara prevlaka radi povećanja otpornosti na habanje (scuffing) i smanjenja trenja u uslovima graničnog podmazivanja. Na taj način razvoj, koji je tribološki orijentisan i baziran na materijalima, ima direktan uticaj na budućnost značaja EP/AV aditiva i modifikatora trenja.

Razvoj motora Dajmleer-Benc sa jedнократnim podmazivanjem u toku veka upotrebe motora, odnosno potpuno hermetički zatvorene unutrašnjosti motora, predstavlja bitno približavanje potpuno ekološkom motoru. Ovaj koncept već uključuje nove materijale. Tečno mazivo

treba da bude biološki brzodegradirajuće, a takođe i postojano tokom celog veka upotrebe motora, uz veoma malu količinu aditiva. Ključnu ulogu ima ugljeni klip, pošto ugljenik pokazuje osobine samopodmazivanja i dobre osobine na ekstremnim pritiscima. Ova konstrukcija nudi i smanjenu potrošnju goriva i smanjenu emisiju, pošto smanjena masa i toplotno širenje omogućavaju manje radne zazor [7].

Međutim, već kod današnjih niskih nivoa potrošnje ulja očekuju se problemi korozivnog habanja kod brzohodnih dizel motora sa hromiranim površinama prstenova. Korozivno habanje je „nemi ubica“ dizel motora. Njegovo postojanje i kontrola pomoću alkalnih deterdženata u ulju dobro su poznati, naširoko su ispitivani između 1940. i 1970. godine. U tom periodu najviše dizel motora je koristilo prstenove od sivog liva u cilindarskim košuljicama, i imali su nivo potrošnje ulja od 1,5–0,5% od potrošnje goriva. Nasuprot tome, praktično svi današnji brzohodni dizel motori rade sa nivoima potrošnje ulja od 0,25–0,10% od potrošnje goriva i koriste košuljice od sivog liva i kompresione prstenove sa hromiranim radnim površinama [8].

## Zaključak

Motorna ulja su važna konstruktivna sastavnica savremenih motora. Sve konstruktivne i tehnološke novine (primena novih antifriktionih materijala, varijabilnih sistema na motoru, realizacija direktnog ubrizgavanja goriva u cilindar pomoću ulja pod pritiskom itd.) moraju da se reflektuju kroz nove pakete aditiva koji ne smeju da imaju zagađivače za katalizatore, kao što su fosfor i hlor, a

potrošnja ulja mora da bude daleko niža od današnje (manje od 0,1% potrošnje goriva) [9]. Svi ti zahtevi mogu da budu ispunjeni jedino pod uslovom da automobilska i petrohemijska industrija rade zajedno na formulaciji novih sredstava za podmazivanje.

*Literatura:*

- [1] Chamberlin, B.W., Sheahan, J.T.: Automotive Fuel Savings Through Selected Lubricants, SAE 750377.
- [2] Haller, R., Lehmann, U.: Reibungs- und Verschleißverhalten instationär belasteter Radialgleitlager, MTZ 7-8/1990., st. 320-326.
- [3] Schieber, G., Sander, W.: Heavy - Duty pistons for diesel engines, Karl Schmidt (publikacija).
- [4] Građin, B.Z.: Analiza mehaničkih gubitaka dizel motora sa direktnim ubrizgavanjem, magistarski rad, 2000. g.
- [5] Monaghan, M.L.: Engine Friction - a Change In Emphasis The Institution of Mechanical Engineering BP, Tribology Lecture, 1987., pp. 14.
- [6] Plint, M.A., Aliston-Greiner, A.F.: Tribology, Lubrication and Wear, Tribology International, st. 225-229.
- [7] Woydt, M.: Once in a lifetime - Materials and fluid - based concepts for lifetime lubricated engines, Engine Technology International, Issue 3/1998, st. 36-39.
- [8] McGeehan, J.A., Kulkarni, A.V.: Wear control in diesels : influens of lubricants, Automotive Engineering, Volume 96, №9, sept. 1988, st. 56-61.
- [9] Pešić, R. i drugi: Trendovi u razvoju savremenih motora i pogonskih materijala za vozila. Stručno savetovanje GALAX '98, Kopaonik 1998., Zbornik radova, st. 127-137.

*Rezime:*

*Kvalitet usluga QoS (Quality of Service) – multimedijalnih telekomunikacionih mreža razmatran je preko nivoa performansi, kategorija parametara kvaliteta, translacije parametara, kao i zahteva za saobraćaj i kvalitet prenosa u telekomunikacionoj mreži. Prezentirani su parametri kvaliteta govornih i audio signala, video signala, grafičkih dokumenata i podataka. Analizirani su QoS parametri kvaliteta ATM multimedijalnih mreža. QoS predstavlja jedan od važnih polaznih elemenata u projektovanju i realizaciji multimedijalnih mreža. S obzirom na to da je QoS određen skupom od nekoliko desetina parametara, problem je kako će se njime upravljati ako u mreži dođe do degradacije kvaliteta. U radu je predložen originalni algoritamski postupak za analizu i upravljanje QoS-om multimedijalne mreže.*

*Ključne reči: multimedijalne telekomunikacione mreže, kvalitet usluga, analiza kvaliteta, upravljanje kvalitetom, parametri kvaliteta.*

---

**MULTIMEDIA COMMUNICATIONS QUALITY OF SERVICE  
ANALYSIS**

*Summary:*

*This paper present the analysis of the multimedia communication quality of service (QoS) and a new concept for the QoS management. One of the main questions with respect to the real-time multimedia information over traditional and next generation networks is the quality of service, and how to manage the QoS. This paper offers one possible solution.*

*Key words: multimedia networks, Quality of Service – QoS, quality analysis, quality management, parameters of quality.*

---

**Uvod**

Multimedijalne telekomunikacione mreže, za razliku od klasičnih monomedijalnih mreža (telefonska mreža, mreža za prenos podataka, telegrafska mreža, telefaks mreža, mobilna telefonska mreža, mreža za distribuciju video signala, itd.), omogućavaju korisniku komunikaciju sa jednim ili više učesnika istovremeno, razmenom informacija u više medija kao što su: govor, audio signali, štampani ili ru-

kom pisani tekst, podaci, grafika, video slike i slično, pri čemu se takve poruke mogu računarski procesirati. U takvoj komunikaciji korisnik raspolaže jednim kanalom veze potrebnog propusnog opsega, kapaciteta (informacionog protoka) i kvaliteta. Poseban značaj u multimedijalnoj komunikaciji ima *kvalitet usluga* (u daljem tekstu QoS). Taj značaj ogleda se u sledećem:

– pri projektovanju multimedijalnih mreža QoS definiše kriterijume za ocenu

moćnosti date telekomunikacione strukture (sistema veza) za izgradnju multimedijalne mreže;

– zahtevani parametri QoS-a direktno utiču na cenu realizacije multimedijalne telekomunikacione ili računarske mreže.

## Opšte o kvalitetu usluga

### Definicije QoS-a

Pri projektovanju i realizaciji multimedijalne mreže ili određenih multimedijalnih aplikacija nezaobilazan je izbor određenog QoS-a. Analiza ponašanja određene mreže u eksploataciji, izbor algoritama rutiranja saobraćaja i implementacija nekog algoritma za sinhronizaciju zasnivaju se na željenom QoS-u. Ne postoji jedinstvena definicija QoS-a, već više definicija koje opisuju tehničke performanse prenosa multimedijalnih poruka u zavisnosti od karakteristika date mreže i vrste multimedijalne aplikacije. Preporukom E.800 Međunarodne unije za telekomunikacije (ITU-T) kvalitet usluga se definiše kao efekat performansi usluge kojim je određen stepen zadovoljstva korisnika datom uslugom [1]. Na sličan način, u dokumentu Foruma za multimedijalne telekomunikacije (oznake MMCF/95-010), QoS se definiše kao skup karakteristika usluge koje određuju stepen zadovoljstva korisnika ponuđenom telekomunikacionom uslugom.

Preporukom ITU-T X.902 kvalitet usluga se definiše kao skup zahteva u pogledu kvaliteta koji opisuju grupno ponašanje jednog ili više objekata medija [2].

U ATM (Asynchronous Transfer Mode – asinhroni način transfera) leksikonu QoS se definiše kao termin koji se

odnosi na skup parametara za opisivanje ATM karakteristika kvaliteta, koje karakterišu saobraćaj na konkretnom virtuelnom putu ATM veze. U ovom slučaju parametre kvaliteta čine: verovatnoća gubitka ćelija, broj pogrešno prenetih ćelija, stepen pogrešno ubačenih ćelija, kašnjenje ćelija u prenosu, varijacija kašnjenja ćelije, kapacitet transfera ćelija, verovatnoća bitske greške (BER) i drugi. Uočava se da je kod ATM-a QoS definisan skupom parametara koji se mogu kvantitativno meriti.

### Zahtevi za QoS

U tehničkom pogledu QoS predstavlja skup merljivih performansi, odnosno karakteristika multimedijalne mreže, među kojima su najznačajnije sledeće:

– raspoloživost (Availability). U idealnom slučaju mreža treba da bude raspoloživa u 100% radnog vremena, što u realnim uslovima eksploatacije nije ostvarivo. Kvalitetnim se smatraju one mreže čija raspoloživost iznosi 99,9999% radnog vremena („šest devetki“), što odgovara jednom prekidu u trajanju 2,6 sekundi mesečno [3];

– efektivni kapacitet ili propusna sposobnost (Throughput). Ovaj parametar označava efektivnu brzinu prenosa podataka, izraženu brojem prenetih informacionih bita u sekundi. Ova veličina je manja od kapaciteta kanala i bitskog protoka u mreži. U multimedijalnim mrežama definiše se efektivna propusna sposobnost, odnosno, najniža brzina prenosa informacija;

– gubitak paketa (Packet loss) u mreži nastaje kada dođe do prepunjavanja bafera u komutacionim sistemima i ruterima, kao posledica čekanja paketa u redovima za usmeravanje, odnosno ruti-

Upoređenje karakteristika multimedijalnog saobraćaja i saobraćaja u tradicionalnim mrežama

Karakteristike saobraćaja	Saobraćaj u tradicionalnim mrežama	Multimedijalni saobraćaj
Brzina prenosa	mala	velika
Osobine saobraćaja	„naletni“	izrazito „naletni“
Zahtevi za pouzdani prenos	bez gubitaka	mali gubici
Zahtevi za kašnjenje	nema	malo, npr. 20–30 ms
Način komunikacije	tačka-tačka	između više tačaka (multipoint)
Vremenska zavisnost prenosa	nema	sinhronizovan prenos

ranje. Do gubitaka paketa, takođe, može doći ako se usled grešaka u prenosu paket usmeri na pogrešno odredište. U mrežama sa dobro rešenim upravljanjem gubitak paketa prosečno iznosi manje od 1% mesečno;

– kašnjenje (Latency). Vreme potrebno da se paketska poruka prenese od izvora do odredišta definiše se kao kašnjenje. Veličina kašnjenja zavisi od niza faktora kao što su: kašnjenje pri kodovanju – dekodovanju i kompresiji – dekompresiji, kašnjenje zbog paketizacije, kašnjenje u prenosu, kašnjenje propagacije po različitim medijima prenosa, kašnjenje pri komutaciji, kašnjenje zbog čekanja u baferima, kašnjenje pri reasembliranju poruke, itd.;

– varijacija kašnjenja (Jitter). Na pojavu džitera, ili varijacije kašnjenja, utiču brojni faktori kao što su: varijacija dužine redova čekanja paketa, varijacija vremena obrade paketa, varijacija trajanja vremena reasembliranja paketa, itd.

### Karakteristike multimedijalnog saobraćaja

Kvalitet usluga i efikasnost upravljanja kvalitetom QoS-om znatno zavise od karakteristika multimedijalnog saobraćaja. Priroda multimedijalnog saobraćaja zavisi od toga da li se prenos u mreži obavlja konstantnim ili promenljivim bit-skim protokom, a takođe i u kojoj meri je saobraćaj osetljiv na kašnjenje složenih multimedijalnih poruka koje se prenose i drugih elemenata.

U tabeli 1 prikazane su razlike između multimedijalnog saobraćaja i saobraćaja u tradicionalnim telekomunikacionim mrežama.

U multimedijalnim mrežama zahtevaju se velike brzine prenosa u odnosu

na tradicionalne mreže, a saobraćaj je izrazito „naletni“, što znači da u kratkim vremenskim intervalima treba preneti veoma veliku količinu informacija. Od multimedijalnih mreža zahteva se prenos poruka (govor, video slika) u realnom vremenu, a pri tome se mora obezbediti sinhronizovani prenos. Zahtevi za bitske brzine prenosa i osetljivost u prenosu različitih tipova informacija u multimedijalnoj komunikaciji prikazani su u tabeli 2.

Multimedijalne aplikacije u realnom vremenu znatno se razlikuju po karakteristikama od aplikacije tradicionalnih računarskih, odnosno telekomunikacionih mreža. Razlike se ogledaju u:

– većoj osetljivosti na promene QoS parametara u odnosu na klasične aplikacije. Multimedijalne aplikacije u realnom vremenu (tabela 2) osetljive su na kašnjenje i greške, odnosno gubitak segmenata poruke. Kod multimedijalnih aplikacija nije moguća primena metoda i tehnika za korekciju grešaka nastalih u prenosu;

– velikom broju multimedijalnih informacija u realnom vremenu koje generišu kontinualan saobraćaj u dužem pe-



Zahtevi za protok i osetljivost u prenosu različitih tipova informacija

Karakteristike saobraćaja	Tip informacije	Bitski protok (b/s)	Osetljivost na kašnjenje	Osetljivost na greške
Kontinualni dupleksni saobraćaj (dijalog, kooperacija)	- telefonija, govor - video „licem u lice“ (H.261, H.263, MPEG-1)	5,3k-64k 128k-2M	mala mala	velika srednja
Kontinualni simpleksni saobraćaj (distribucija, kooperacija)	- Hi Fi audio - standardni TV video (MPEG-2) - studijski kvalitet TV video signala (pokret, JPEG)	192 k - 1,4 M do 10M 20M - 50M	velika srednja srednja	srednja mala mala
Naletni saobraćaj (razmena poruka, transakcije, distribucija, kooperacija)	- slike visoke rezolucije - podaci (transfer fajlova) - upravljački podaci	64k - 8M 64k i veći 16k	velika velika mala	srednja srednja mala

JPEG (Joint Photographic Expert Group)

MPEG (Motion Picture Expert Group)

RPC (Remote Procedure Call)

riodu. Zbog toga mreža mora u kontinuitetu da obezbedi potrebne resurse;

- specifičnostima multimedijalnog saobraćaja koje se ogledaju u njegovoj „naletnosti“, odnosno nepredvidivosti u smislu pojave zahteva za posluživanje. To otežava proceduru dodele potrebnih resursa zahtevanoj vezi. Tako, na primer, dodela resursa na bazi prosečne bitske brzine ne može da obezbedi zahteve QoS-a, a dodela resursa na bazi maksimalnih brzina dovodi do smanjenja efikasnosti mreže. To se, svakako, odnosi na mreže koje podržavaju komunikaciju promenljivim brzinama.

### Nivoi kvaliteta usluga

U određenoj mreži nivo kvaliteta njenih QoS performansi (tabela 3) može biti:

- garantovan, u slučaju kada multimedijalna mreža obezbeđuje korisniku garantovan kvalitet usluga. Garantovani QoS obezbeđuje se analizom tzv. „worst-case“ saobraćaja i rezervacijom resursa potrebnih za realizaciju zahtevanog QoS-a. U slučaju kada se QoS ovako obezbe-

đuje, mreža će imati mali stepen iskorišćenja resursa;

- statistički, u slučaju kada je mala verovatnoća da zahtevani QoS neće biti realizovan. Statistički QoS se realizuje na bazi analize statističkih parametara saobraćaja, na osnovu koje mreža sprečava degradaciju QoS-a ispod unapred definisanog nivoa;

- prediktivni, kada mreža pokušava da obezbedi QoS uz mogućnost neuspešnih pokušaja. Nadgledanjem stepena iskorišćenja resursa mreže i QoS performansi

Tabela 3

### Nivoi QoS performansi

Nivo QoS performansi	Realizacija zahtevanog QoS parametara Q	QoS pouzdanost	Korišćenje resursa
Garantovan	Q je garantovan	velika	malo
Statistički	mala verovatnoća da Q neće biti realizovan	velika	malo
Prediktivni	mreža pokušava da obezbedi Q uz mogućnost neuspešnih pokušaja	velika	malo
„Best-effort“	Q se ignoriše pri obezbeđivanju usluge	mala	veliko

vrši se adaptacija u skladu sa promenjenim uslovima u mreži, kako bi se time ostvario zahtevani QoS;

– „best-effort“, u slučaju kada se QoS ignoriše pri obezbeđivanju usluge, a tipičan primer su tradicionalne LAN/WAN mreže. Ovakav QoS nije pogodan za distribuirane mreže, zbog toga što ne uzima u obzir specifične zahteve određene aplikacije koje zahteva odgovarajući nivo QoS-a.

U tabeli 4 prikazani su nivoi kvaliteta različitih usluga, kao što su: prenos govora i audio signala, prenos video signala, prenos dokumenata i grafike i prenos podataka.

#### Kategorizacija i translacija QoS parametara

S obzirom na složenost problema određivanja i obezbeđenja QoS razlikuju se kategorije QoS-a. U tabeli 5 prikazana

Tabela 4

#### Nivoi kvaliteta usluga

Službe	Nivo kvaliteta usluga
Prenos audio signala	telefonski govorni signal (300×3400 Hz) MPEG kvalitet govornog signala Hi-Fi kvalitet audio signala CD-kvalitet audio signala studijski kvalitet audio signala
Prenos video signala	slika male rezolucije (128 × 220 piksela) VCR (Video Cassete Recorder) kvalitet TV studijski kvalitet slike TV visoke definicije (HDTV) MPEG-1 kvalitet slike MPEG-2 kvalitet slike MPEG-4 kvalitet slike
Prenos dokumenata i grafike	grafički dokumenti male rezolucije dokumenti preneti faksimilom grupe 3 dokumenti preneti faksimilom grupe 4 mirne slike i dokumenti visoke rezolucije (256 nijansi) mirne slike u boji visoke rezolucije
Prenos podataka	prenos fajlova sa kašnjenjem prenos fajlova sa ograničenim kašnjenjem

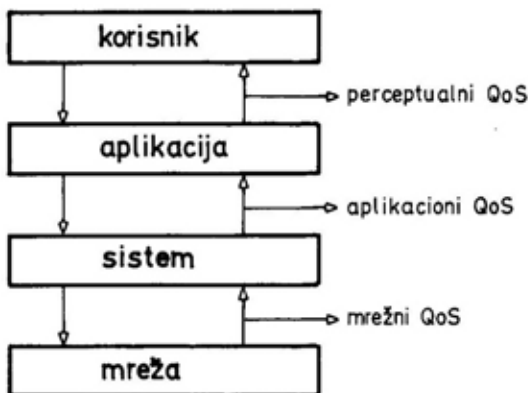
#### Kategorizacija QoS parametara

Kategorija	Primeri parametara
Performanse	kašnjenje od kraja do kraja, bitska brzina
Format	video rezolucija, brzina prenosa rama, šema kompresije, memorijski medij
Sinhronizacija	kašnjenje između audio i video sekvenci
Cena	cena veze i prenosa
Korisnik	subjektivni kvalitet slike i zvuka

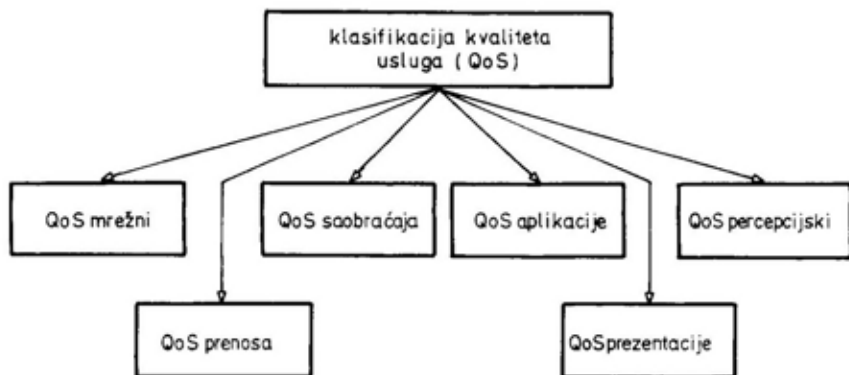
je podela QoS parametara u pet kategorija sa primerima njihove primene.

Složenost QoS-a ogleda se, pored ostalog, u postojanju razlika između parametara koji se odnose na aplikaciju i mrežnih QoS parametara. Poseban značaj ima veza između tih parametara, odnosno pretvaranje (mapiranje) korisničkih – aplikativnih QoS parametara u mrežne QoS parametre.

Na slici 1 prikazana je translacija percepcijskih u aplikativne, a aplikativnih u mrežne QoS parametre i obratno. Jedna opšta klasifikacija QoS-a prikazana je na slici 2. Vidi se da je QoS definisan prema određenom korisniku (percepcija, aplikacija) i prema sistemu (terminal, mreža, prenos). Mapiranjem se postiže



Sl. 1 – Translacija QoS parametara



Sl. 2 – Klasifikacija QoS-a

povezivanje, odnosno translacija jednog u drugi QoS.

Multimedijalna mreža mapira aplikativne QoS zahteve u skup parametara koji opisuju multimedijalni terminal, protokole i mrežu. Karakteristike terminala i mrežnih elemenata koji su angažovani u procesu multimedijalne komunikacije definišu se preko *aplikativnih QoS parametara*. Tako, na primer, kvalitet video signala definiše se brzinom prenosa rama (15 ili 30 rama/s), veličinom rama (visina x širina) izraženom u pikselima i drugim.

Parametri koji se koriste za opis kvaliteta individualnih medijuma, od kojih se formira multimedijalna poruka, nazivaju se *parametrima kvaliteta medijuma*. Parametri kvaliteta medijuma mogu se podeliti na „interfrejm“ i „intrafrejm“ parametre. Prva grupa parametara odnosi se na karakteristike homogenog niza određenog medijuma, kao što su veličina odmerka, brzina odmeravanja, protok, itd. Druga grupa parametara omogućava opisivanje razlika u kvalitetu pojedinih odmeraka medijuma, kao što je kašnjenje ili pomak između dva medijuma, npr. između govornog i video signala.

Prenosni sistem multimedijalne mreže konfiguriše se *mrežnim QoS parametrima*, koji opisuju zahteve koji se odnose na kvalitet mrežne infrastrukture, odnosno mrežnih resursa [3].

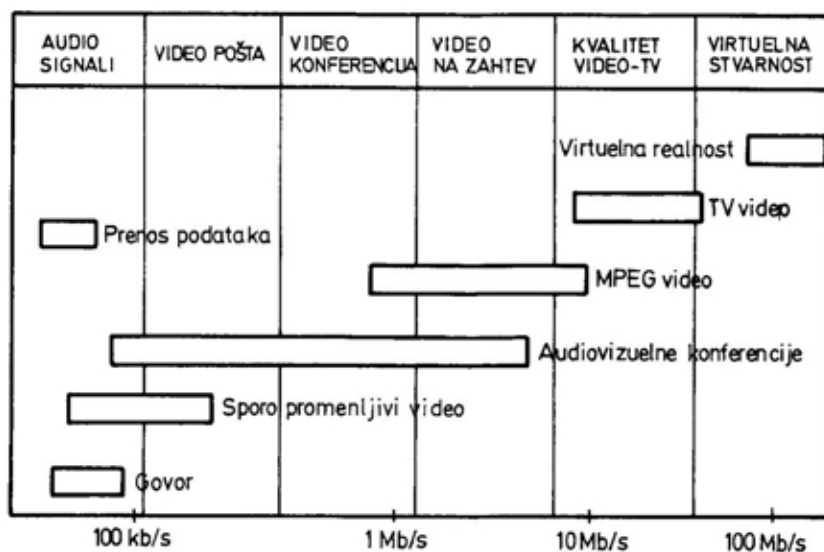
### Analiza parametara kvaliteta usluga

Pri projektovanju multimedijalnih (računarskih, telekomunikacionih) mreža, kroz projektne zahteve, definišu se aplikacije koje treba ba budu obezbeđene korisnicima mreže [4]. Svaki tip aplikacije zahteva određenu širinu propusnog opsega kanala u multimedijalnoj mreži.

Na slici 3 prikazani su potrebni propusni opsezi za različite multimedijalne aplikacije kao što su: govorni i audio signali, video pošta, video konferencija, video na zahtev uz primenu kompresije (MPEG algoritam), standardna TV video slika i virtuelna realnost.

Po pravilu, preko multimedijalne mreže prenose se različiti tipovi signala. U tabeli 6 prikazana su tri tipa signala, i to:

- audio signali (uskopojasni govor, širokopojasni govor, CD audio signali);



Sl. 3 – Propusni opsezi za različite multimedijalne aplikacije

Tabela 6

Karakteristike standardnih formata za govor, mirne slike i video signale

Tip audio signala	Frekventni opseg	Brzina odmeravanja	Biti po odmerku	Nekomprimovana bitska brzina	Maks. stepen kompresije
Uskopojasni govor	200–3200 Hz	8 kHz	16	128 kb/s	30:1
Širokopojasni govor	50–7000 Hz	16 kHz	16	256 kb/s	15:1
CD Audio	20–20000 Hz	44,1 kHz	16×2 kanala	1,41 Mb/s	22:1

Tip slike	Tačaka po ramu	Biti po tački	Nekomprimovana veličina	Maks. stepen kompresije
FAXIMIL 4	1700×2200	1	3,74 Mb	100:1
VGA	640×480	8	2,46 Mb	100:1
XVGA	1024×768	24	18,87 Mb	100:1

Tip video signala	Tačaka po ramu	Ramova u slici	Biti po tački	Nekomprimovana brzina	Maks. stepen kompresije
HDTV	1920×1080	30	12	746,5 Mb/s	100:1
NTSC	480×483	30	16	111,2 Mb/s	100:1
PAL	576×576	25	16	132,7 Mb/s	100:1
CIF	352×288	15	12	18,2 Mb/s	100:1
CIF-2	320×240	15	8	9,2 Mb/s	100:1
QCIF	176×144	10	12	3,0 Mb/s	100:1
QCIF-2	176×144	10	8	2,03 Mb/s	100:1

QoS zahtevi za prenos audio signala

QoS parametar	Opseg	Opis
Kašnjenje od kraja do kraja	0–150 ms 150–400 ms	prihvatljivo za većinu aplikacija degradacija kvaliteta kod nekih aplikacija
Gubitak paketa	$\leq 10^{-2}$	telefonija
Propusni opseg	16 kb/s 32 kb/s 64 kb/s 128 kb/s 192 kb/s	telefonija audio konferencija } CD audio kvalitet komprimovani MPEG audio signali
Brzina odmeravanja	8 kHz 16 kHz	telefonski kvalitet govora CD audio kvalitet

Tabela 8

QoS zahtevi za prenos video signala

QoS parametar	Opseg	Opis
Bitska brzina	64 kb/s–2 Mb/s 1–2 Mb/s 2–4 Mb/s 3–6 Mb/s 140–166 Mb/s 25–34 Mb/s 500 Mb/s $\geq 1$ Gb/s	H.261 video konferencijski sistemi MPEG-1 VCR kvalitet MPEG-2 komprimovani studijski TV kvalitet nekomprimovani TV HDTV, MPEG-2 kompresija HDTV, kompresija sa gubicima HDTV, nekomprimovani
Gubitak paketa	$\leq 10^{-2}$ $\leq 10^{-11}$	nekomprimovani video komprimovani video
Kašnjenje od kraja do kraja	250 ms 200 ms	video telefonija JPEG video prenos
Džiter	10 ms 5 ms	video telefonija JPEG video prenos
Faktor kompresije	2:1 50:1	HDTV, kompresija bez gubitaka HDTV, kompresija sa gubicima

– mirna slika, grafika (faksimil grupe 4, VGA, XGA);

– video signali (HDTV, NTSC, PAL, CIF, CIF-2, QCIF, QCIF-2).

U tabeli 6 prikazani su: širina frekvencijskog opsega, brzina odmeravanja pri konverziji analognih signala u digitalni oblik, bitska brzina potrebna za prenos nekomprimovanih signala i maksimalni mogući stepen kompresije za pomenute tipove signala. Za svaki tip signala definišu se posebni QoS zahtevi, odnosno QoS parametri kvaliteta.

U tabeli 7 prikazani su QoS parametri: kašnjenje od kraja do kraja veze, granična dozvoljena verovatnoća gubitka paketa govornog signala, propusni opseg za odgovarajući nivo kvaliteta usluge i brzina odmeravanja pri analogno-digitalnoj konverziji govornih signala. QoS parametri dati su za različite aplikacije, odnosno nivoe usluga.

U tabeli 8 prikazani su QoS zahtevi za prenos video signala u multimedijalnim telekomunikacionim mrežama.

Parametri kvaliteta govornog signala

Parametri kvaliteta	Definicija kvaliteta i zahtevi										
MOS (Mean Opinion Score – srednja subjektivna ocena)	Subjektivna mera kvaliteta dobijena testiranjem grupe slušalaca. Kreće se od ocene 5 (odličan) do 0 (neprihvatljivo). Tipične vrednosti za VoIP kreću se između 3,5 do 4,2										
PSQM (Perceptual Speech Quality Measure – percepcijska mera kvaliteta govora)	Objektivna mera za kvalitet govornog signala. Dobija se pri prenosu govornog test-signala kroz mrežu. Porede se referentni i primljeni test-signali.										
QDU (Quantization Distorsion Unit – izobličenja signala pri kvantovanju)	Mera izobličenja govornog signala, koje nastaje pri kvantovanju i kodovanju.										
R-faktor	Koristi se za ocenjivanje kvaliteta govora pri prenosu kroz mrežu od usta do uha. Primenjuje se za procenu MOS rezultata.										
Kašnjenje govornog signala pri obradi i prenosu kroz komunikacionu mrežu	<table> <tr> <td>0 do 25 ms</td> <td>odličan kvalitet</td> </tr> <tr> <td>25 do 150 ms</td> <td>dobar kvalitet</td> </tr> <tr> <td>150 do 300 ms</td> <td>zadovoljava</td> </tr> <tr> <td>300 do 450 ms</td> <td>degradiran</td> </tr> <tr> <td>veće od 450 ms</td> <td>neprihvatljiv kvalitet</td> </tr> </table>	0 do 25 ms	odličan kvalitet	25 do 150 ms	dobar kvalitet	150 do 300 ms	zadovoljava	300 do 450 ms	degradiran	veće od 450 ms	neprihvatljiv kvalitet
0 do 25 ms	odličan kvalitet										
25 do 150 ms	dobar kvalitet										
150 do 300 ms	zadovoljava										
300 do 450 ms	degradiran										
veće od 450 ms	neprihvatljiv kvalitet										
Varijacija kašnjenja (džiter)	<table> <tr> <td>Video konferencija</td> <td>do 130 ms,</td> </tr> <tr> <td>Govorni signal ispred video signala</td> <td>&lt; 20 ms</td> </tr> <tr> <td>Govorni signal iza video signala</td> <td>&lt; 120 ms</td> </tr> <tr> <td>MPEG govorni signal</td> <td>&lt; 0,1 ms</td> </tr> </table>	Video konferencija	do 130 ms,	Govorni signal ispred video signala	< 20 ms	Govorni signal iza video signala	< 120 ms	MPEG govorni signal	< 0,1 ms		
Video konferencija	do 130 ms,										
Govorni signal ispred video signala	< 20 ms										
Govorni signal iza video signala	< 120 ms										
MPEG govorni signal	< 0,1 ms										

U ovom slučaju QoS parametri su: bitska brzina za različite nivoe kompresije ili percepcijskog kvaliteta video signala, dozvoljena verovatnoća gubitka paketa komprimovanog i nekomprimovanog video signala, kašnjenje u prenosu od kraja do kraja veze, dopuštena vrednost džitera, kao i opseg faktora kompresije televizijskog video signala visoke definicije (HDTV).

Pored QoS parametara prenosa signala definišu se tzv. *percepcijski parametri QoS-a*.

U tabeli 9 prikazani su percepcijski parametri kvaliteta govornog signala.

Parametri kvaliteta govornog signala [5] koji omogućavaju ocenu vernosti, razumljivosti i drugih karakteristika su:

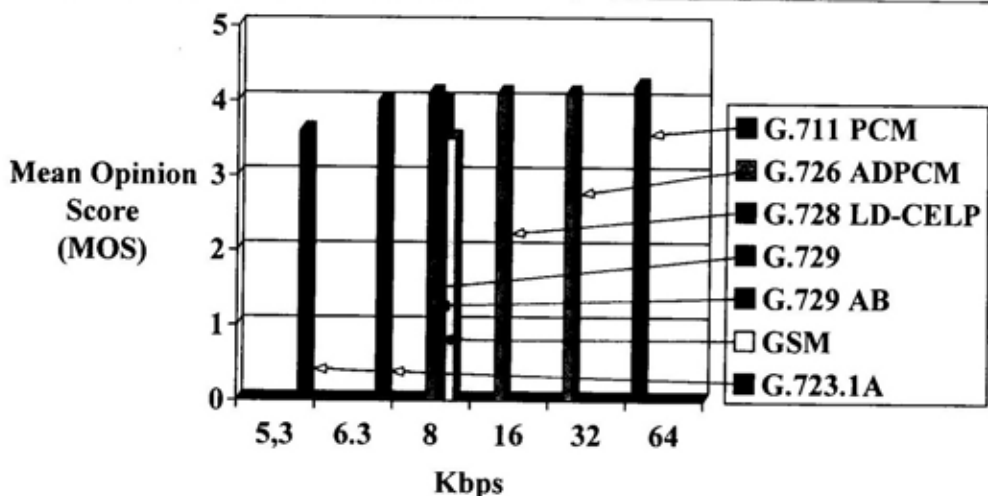
– MOS – Mean Opinion Score, predstavlja meru za kvalitet govora, odnosno subjektivnu ocenu kvaliteta koja se dobija testiranjem grupe slušalaca. Vrednost MOS-a kreće se od ocene 5

(odlično) do ocene 0 (neprihvatljivo). Vrednosti MOS parametara za različite algoritme kompresije – dekompresije govornog signala prikazane su na slici 4 [6];

– PSQM – Perceptual Speech Quality, predstavlja objektivnu meru za kvalitet govora koji se dobija pri prenosu ispitnog test-govornog signala kroz mrežu i njegovog poređenja sa referentnim signalom na odredištu;

– QDU – Quantization Distortion Unit, predstavlja meru izobličenja, koje je nastalo pri kvantizaciji, odmeravanju i kodovanju govornog signala. Ne predstavlja najpogodniju meru kvaliteta za performanse modernih najnovijih algoritama za kompresiju i kodno predstavljanje govornih signala;

– R – faktor, predstavlja metodu ocenjivanja kvaliteta prenosa govora u datoj telekomunikacionoj mreži. Obično se koristi za procenu MOS rezultata. Kategorije kvaliteta prenosa govora pred-



Sl. 4 – MOS vrednosti za različite algoritme kompresije govornog signala

Tabela 9b

Kategorije kvaliteta prenosa govora prema ITU-T G.109

Opseg R – vrednosti	100–90	90–80	80–70	70–60	60–0
Kategorija kvaliteta prenosa govora	najbolji (best)	visok (high)	srednji (medium)	nizak (low)	vrlo slab (very poor)

stavljene opsezima vrednosti R-faktora prikazane su u tabeli 9b [7];

– Delay – kašnjenje kojim se definišu dozvoljena granična kašnjenja govora u odnosu na zahtevani kvalitet. U tabeli 9 prikazani su nivoi kvaliteta (ocene kvaliteta) u zavisnosti od veličine kašnjenja;

– Jitter – džiter predstavlja varijaciju kašnjenja u mreži. Nastaje u slučaju kada se paketi govornog signala (slično važi i za druge multimedijalne poruke, odnosno pakete) prenose sa različitim kašnjenjem.

Za određene multimedijalne aplikacije definiše se granično kašnjenje i maksimalni džiter paketa od kraja do kraja veze. U tabeli 10 prikazane su dozvoljene granične vrednosti kašnjenja i džitera za neke audio i video službe. Vrednosti

intermedijalnog kašnjenja kod nekih multimedijalnih aplikacija prikazane su u tabeli 11.

Tabela 10

Kašnjenje i varijacija kašnjenja (džiter) za audio i video službe

Služba (primena)	Kašnjenje (ms)	Džiter (ms)
64 kb/s video konferencija	300	130
1,5 Mb/s MPEG video signali	5	6,5
20 Mb/s HDTV video signali	0,8	1
16 kb/s komprimovani govorni signali	30	0,1
256 kb/s MPEG govorni signali	7	0,1

Vrednosti intermedijalnog kašnjenja u nekim multimedijalnim aplikacijama

Multimedijalna primena	Kašnjenje
audio+tekst ili slika (veza point to point)	grubo kašnjenje < 1 s
audio+video (veza multipoint – multipoint)	grubo kašnjenje < 200 s fino kašnjenje: – audio unapred prema video < 20 s – video unapred prema audio < 120 s
kompleksna konferencija audio+video+ slika+tekst	grubo kašnjenje < 200 s fino kašnjenje: – audio unapred prema video < 20 s – video unapred prema audio < 120 s

### Analiza parametara kvaliteta usluga ATM mreža

Koncepcija ATM mreža zasniva se na prenosu i komutaciji digitalnih signala u formi paketa fiksne dužine 53 bajta, od čega 5 bajtova čini zaglavlje, a 48 bajtova sadrži korisničku informaciju. Takav paket nazvan je *ćelija* kako bi se napravila razlika između ATM-a i paketskog prenosa u računarskim mrežama.

ATM mreže realizuju se sa ciljem da se u njima po jednom kanalu obezbedi istovremeni (simultani) prenos govora, audio i video signala, grafičkih poruka i podataka, odn. da obezbedi prenos multimedijalnih poruka. Za svaki tip medija mreža treba da obezbedi prihvatljivi nivo kvaliteta performansi. Nije jednostavno da se pri istovremenom prenosu različitih vrsta poruka, za svaku od njih obezbedi zahtevani kvalitet. Nije u pitanju samo zahtevana širina propusnog opsega, već problemi koji se odnose na uticaj kašnjenja i grešaka nastalih u prenosu i trajanju prenosa poruke [8].

Međunarodna unija za telekomunikacije, odnosno ITU-T, svojom preporukom I.35B definisala je za ATM, odnosno širokopojasne mreže, slučajeve koji se mogu dogoditi pri prenosu ćelija kroz ATM mrežu [8]:

- uspešno preneti ćelija (Successfully Cell). Ćelija dolazi na određište sa kašnjenjem koje je manje od T. Nema uticaja grešaka na informacioni sadržaj (Payload) ćelije. Ćelija mora stići na određište u definisanom vremenu, ali to ne znači da u informacionom sadržaju ne može biti grešaka;

- ćelija sa greškom (Errored Cell). Ćelija dolazi na određište sa najmanje jednom detektovanom bitskom greškom u informacionom polju ćelije. Druga mogućnost je da postoji nekoliko bitskih grešaka u informaciji koju nosi ćelija, pri čemu je broj grešaka N ( $N > 1$ ). Broj dozvoljenih grešaka nije definisan, odnosno ITU-T ga nije standardizovao. Prihvatljiva vrednost bi mogla biti  $N=2$ ;

- izgubljena ćelija (Lost Cell). Ćelija nekada ne stigne na određište ili stigne sa kašnjenjem većim od T. U tom slučaju se primljena ćelija odbacuje;

- ubačena ćelija (Inserted Cell). Ćelija sadrži nedetektovanu grešku u svom zaglavlju ili je pogrešno usmerena u nekom čvoru ATM mreže, usled čega je dospela na pogrešnu destinaciju.

Imajući u vidu navedene slučajeve koji se mogu pojaviti u komunikaciji, performanse ATM mreže karakterišu sledeći parametri kvaliteta:

1. Verovatnoća (stepen) gubitka ćelija (Cell Loss Ratio), koja se definiše odnosom broja izgubljenih ćelija prema zbiru broja izgubljenih i uspešno prenetih (isporučenih korisniku).

2. Brzina ubacivanja ćelija (Cell Insertion Rate), koja se definiše kao broj



ubačenih ćelija u niz otpremljenih ćelija u datom kanalu ATM mreže, u posmatranom vremenskom intervalu ili u jedinici vremena za određenu vezu. Ovaj parametar definiše ITU-T. ATM forum koji se, pored ostalog, bavi standardizacijom u oblasti ATM, redefinisao je prethodni parametar uvodeći novi parametar stepen ubacivanja ćelija (Cell Insertion Rate). Po novoj definiciji stepen ubačenih ćelija meri se kao ukupan broj ubačenih ćelija na nekoj vezi, podeljen zbirom broja ubačenih ćelija i broja otpremljenih ćelija po datoj vezi.

3. Verovatnoća (stepen) prosečno pogrešnih ćelija (Severely Insertion Rate), koja se definiše kao njihov odnos (broj ćelija sa više od jednog pogrešnog bita u zaglavlju) prema broju uspešno prenetih ćelija (isporučenih korisniku bez grešaka).

4. Kapacitet transfera ćelija (Cell Transfer Capacity) koji predstavlja maksimalan broj uspešno prenetih ćelija preko definisane ATM veze, u jedinici vremena.

5. Kašnjenje u transferu ćelija (Cell Transfer Delay) koje sadrži dve komponente: minimalno kašnjenje u transferu ćelije i aritmetičku srednju vrednost kašnjenja određenog broja ćelija.

6. Varijacija kašnjenja (Cell Delay Variation), koja u transferu ćelija, takođe, predstavlja kritičan parametar za kvalitet prenosa, posebno kada se radi o prenosu u realnom vremenu, kao što je prenos govora i video slike.

7. Verovatnoća (stepen) bitske greške (Bit Error Rate), koja se definiše kao odnos broja pogrešnih prema ukupnom broju prenetih bita na posmatranom kanalu veze.

Parametri kvaliteta prikazani su u tabeli 12.

Navedeni parametri kvaliteta spadaju u klasu QoS-a parametara prenosa, i predstavljaju veličine koje se mere u ATM mreži. Za to se koriste ATM analizatori protokola (ATM Protocol Analyzer). Rezultati dobijeni merenjem omogućavaju da se uoče i otklone problemi

Tabela 12

Parametri kvaliteta prenosa u širokopojasnim (ATM) mrežama

Red. br.	Parametar kvaliteta QoS prenosa	Definicija
1.	stepen gubitka ćelija (Cell Loss Ratio) – CLR	Odnos broja izgubljenih prema zbiru broja izgubljenih i uspešno prenetih ćelija
2.	brzina ubacivanja ćelija (Cell Insertion Rate) – CIRA	Broj ubačenih ćelija (u nizu primljenih u posmatranom intervalu) u jedinici vremena
3.	stepen ubacivanja ćelija (Cell Insertion Ratio) – CIR	Odnos broja ubačenih ćelija prema zbiru broja ubačenih i broja otpremljenih ćelija
4.	stepen prosečno pogrešnih ćelija (Severely Cell Ratio) – SCR	Odnos prosečnog broja pogrešnih ćelija prema broju uspešno prenetih ćelija
5.	kapacitet transfera ćelija (Cell Transfer Capacity) – CTC	Maksimalan broj uspešno prenetih ćelija u jedinici vremena (na posmatranoj vezi)
6.	kašnjenje u transferu ćelija (Cell Transfer Variation) – CTO	Aritmetička srednja vrednost kašnjenja određenog broja ćelija
7.	varijacija kašnjenja ćelije (Cell Delay Variation) – CDV	Ukupno kašnjenje u prenosu i komutaciji između dva odredišta u mreži (450 $\mu$ s po komutacionom čvoru za govorni signal)
8.	stepen greške bita – količnik grešaka BER (Bit Error Rate)	Odnos broja pogrešnih bita prema broju ukupno prenetih bita u posmatranom intervalu

Klase bitskih brzina i kvalitet usluga koje podržava ATM mreža

Parametri kvaliteta usluga	Klase bitskih brzina			
	Konstantna bitska brzina (CBR)	Promenljiva bitska brzina (VBR)	Neodređena bitska brzina (UBR)	Raspoloživa bitska brzina (ABR)
Rad u realnom vremenu	da	da/ne	ne	ne
Garantovana širina propusnog opsega	da	da	ne	da
Garantovana (ugovorena) varijacija kašnjenja	da	da/ne	nema „ugovorenih“ parametara kvaliteta	ne
Garantovano kašnjenje ćelija	da	da		ne
Definisani (ugovoreni) dozvoljeni gubitak ćelija	da	da		ne
Vršni gubitak ćelija	da	da	da (eksplicitno ili implicitno)	da
Povratna informacija o zagušenju	ne	ne	ne	da u okviru specijalnih povratnih ćelija
Definisana tolerancija na varijacije kašnjenja	da	da	da	da
Prihvatljivi protok ćelija	ne	da	ne	ne
Maksimalna dužina perioda intenzivnog saobraćaja	ne	da	ne	ne
Minimalni protok ćelija	ne	ne	ne	da
Garantovani protok ćelija	ne	da	ne	da

koji se javljaju u prenosu ćelija za datu vezu ili ATM mrežu.

Za razliku od tradicionalnih računarskih LAN/WAN, mreža uskopojasnog ISDN-a (Integrated Service Digital Network), paketskih mreža i javnih telefonskih mreža, ATM mreže omogućavaju multimedijalnu komunikaciju različitim bitskim brzinama, odnosno protocima, kao što su:

- CBR (Constant Bit Rate) – konstantan bitski protok;
- VBR (Variable Bit Rate) – promenljiv bitski protok;
- ABR (Available Bit Rate) – raspoloživ bitski protok;
- UBR (Unassigned Bit Rate) – ne-naznačen bitski protok.

Pored parametara QoS-a prenosa postoji niz parametara kvaliteta koji se

odnose na pojedine klase bitskih brzina. U tabeli 13 prikazane su klase bitskih brzina i kvalitet usluga koje podržava ATM mreža. Parametri navedeni u tabeli odnose se na saobraćajne karakteristike ATM veza, a spadaju u grupu tzv. kvantitativnih parametara (vršna brzina transfera ćelija, kašnjenje u prenosu, maksimalna dužina perioda intenzivnog saobraćaja, garantovana širina propusnog opsega, itd.).

### Upravljanje kvalitetom usluga

Prethodna analiza pokazuje da QoS multimedijalnih mreža opisuju brojni parametri (u tabelama 4, 6, 7, 8, 9 navedeno je više od 30 parametara kvaliteta). U tabelama 12 i 13 navedeno je preko 20 različitih parametara QoS-a koji se od-

nose na ATM mreže. Pored njih postoje brojni kvalitativni ili percepcijski parametri koji se odnose na kvalitet govora, video slike, grafike i njihove kombinacije u multimedijalnoj komunikaciji. Prema tome, QoS multimedijalne mreže definiše se sa više desetina (preko pedeset) različitih parametara kvaliteta. S obzirom na to postavlja se pitanje kako u takvim uslovima upravljati QoS-om u slučaju kada dođe do degradacije kvaliteta u multimedijalnoj mreži.

Kvalitet usluga koji mreža obezbeđuje korisniku, određen skupom parametara kvaliteta, može se predstaviti *matricom parametara QoS-a* oblika:

$$[Q_z] = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & \dots & q_{2n} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & \dots & q_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{m1} & q_{m2} & q_{m3} & \dots & q_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Elementi  $q_{ij}$  matrice QoS imaju sledeće značenje:

–  $i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$  označavaju redni broj elementa mreže koji je odgovoran za parametre kvaliteta, odnosno koji obezbeđuje definisani ili ugovoreni kvalitet;

–  $j = \{1, 2, 3, \dots, m\}$  su redni brojevi parametara kvaliteta.

Prema tome, elementi matrice parametara QoS-a imaju sledeće vrednosti:

$$q_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{ako } i\text{-ti element mreže ne obezbeđuje } j\text{-ti parametar kvaliteta} \\ 1, & \text{ako } i\text{-ti element obezbeđuje } j\text{-ti kvalitet} \end{cases}$$

Kada mreža funkcioniše regularno, multimedijalni terminal ima dodeljen (ili ugovoren) kvalitet, definisan skupom parametara  $j = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ .

Multimedijalni terminal permanentno kontroliše (slika 5) QoS parametre i upoređuje ih sa očekivanim parametrima kvaliteta  $j = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ . U mreži može doći do degradacije kvaliteta usled različitih spoljnih ili unutrašnjih faktora koji izazivaju određene promene u posmatranoj multimedijalnoj mreži.

Koncept upravljanja kvalitetom usluga multimedijalne telekomunikacione mreže prikazan je blok-šemom na slici 6.

To stanje može se predstaviti *matricom degradacije* [D] oblika:

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & \dots & d_{2n} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & \dots & d_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & d_{m3} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Elementi  $d_{ij}$  matrice degradacije QoS-a imaju sledeće vrednosti:

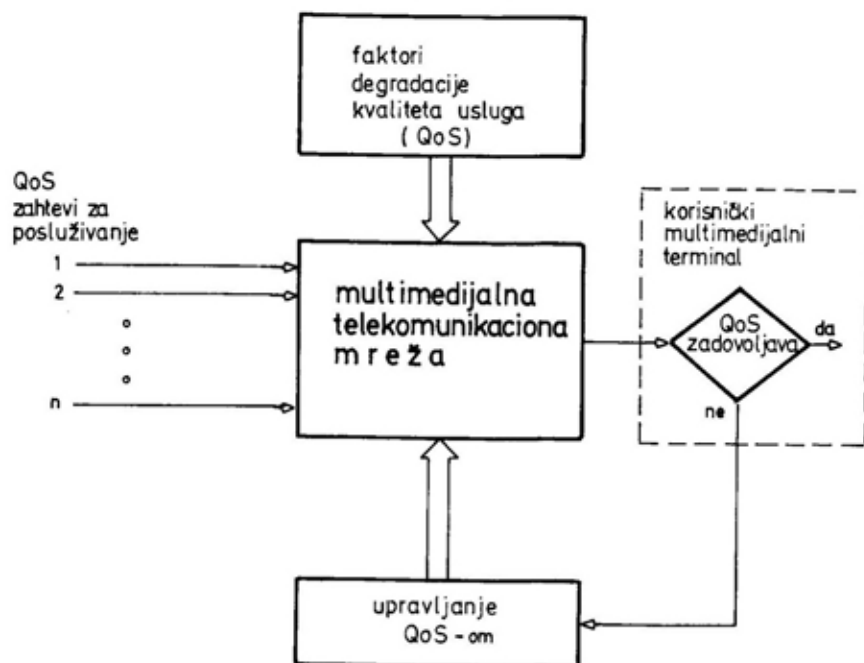
$$d_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{ako } i\text{-ti element mreže nije ugrožen i obezbeđuje } j\text{-ti kvalitet} \\ 1, & \text{ako je } i\text{-ti element ugrožen i obezbeđuje } j\text{-ti parametar kvaliteta} \end{cases}$$

Kvalitet usluga koji korisnik ima u slučaju degradacije ugovorenog kvaliteta može se odrediti kao proizvod *matrice kvaliteta usluga* i *matrice degradacije*:

$$[Q_R] = [Q_Z] * [D]^T \quad (3)$$

koja označava *matricu degradiranog QoS-a*, gde je  $[D]^T$  transponovana matrica matrice [D].

Multimedijalni terminal analizira trenutni kvalitet, odnosno parametre kvaliteta, i detektuje degradirane parametre. Na osnovu tih podataka u povratnoj vezi formiraju se komande kojima se preko sistema za upravljanje mrežom deluje na



Sl. 5 – Upravljanje QoS-om

one elemente mreže koji su narušeni degradacijom. Upravljačke informacije mogu se predstaviti *korekcionom matricom* oblika:

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \dots & k_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{m1} & k_{m2} & k_{m3} & \dots & k_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Element  $k_{ij}$  ima vrednost 0 ako na  $i$ -ti element mreže ne treba delovati radi izmene  $j$ -tog parametra kvaliteta, a ima vrednost 1 ako na  $i$ -ti element mreže treba delovati da bi se obezbedio zahtevani parametar kvaliteta  $j$ .

Ovde se pod elementima mreže podrazumevaju: komutacioni čvorovi, ruteri, mrežne kapije, linkovi koji povezuju čvorove ili rutere, digitalne korisničke

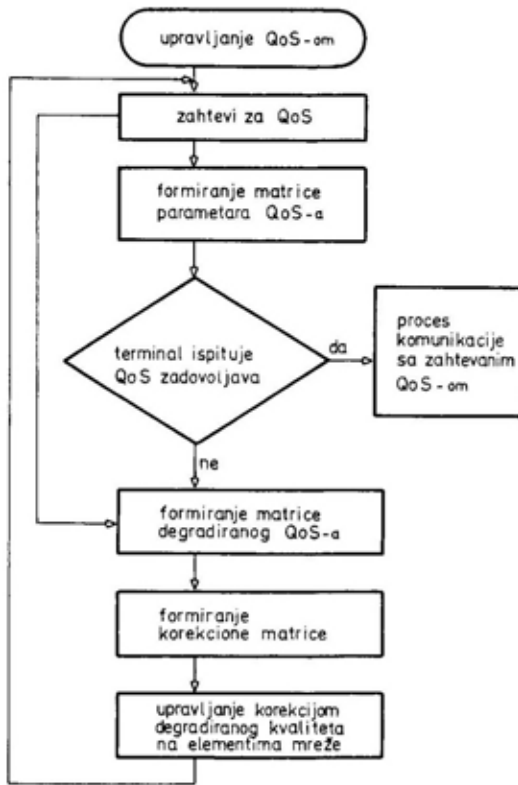
linije kojima su multimedijalni terminali povezani na čvorove, multimedijalni terminali i druga mrežna oprema. U prethodnim relacijama elementi mreže predstavljani su skupom označenim sa  $i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ .

Algoritamski postupak upravljanja QoS-om (slika 6) odvija se prema sledećim koracima:

- korisnik za svaku vezu definiše ili ugovara zahtevani kvalitet usluga;
- za datu vezu u mreži i kod traženog učesnika formira se matrica parametara QoS-a;
- terminal permanentno prati definisani QoS proverom kvaliteta multimedijalne poruke;
- ako neki ili svi parametri QoS-a ne zadovoljavaju u terminalu se formira matrica degradiranog QoS-a;

## Zaključak

Kvalitet usluga postojao je kao tehnički problem u tradicionalnim mrežama, ali je posebno značajan i složen kod multimedijalnih mreža. Ta važnost QoS-a za multimedijalnu komunikaciju proističe iz brojnosti parametara kvaliteta koji su različiti za govor, audio signale, mirnu sliku, grafiku visoke rezolucije, podatke ili video sliku. Problemi mogu nastati u slučaju kada u mreži, usled prirodnih smetnji, namernog ometanja, havarijskih otkaza ili neregularnih saobraćajnih slučajeva dođe do degradacije kvaliteta. U radu je predložen jedan postupak koji omogućava upravljanje mrežom u slučaju kada se dogodi odstupanje QoS-a od definisanog ili ugovorenog nivoa kvaliteta usluga.



Sl. 6 – Algoritamski postupak upravljanja QoS-om

– terminal formira elemente korekcijske matrice koji se preko podsistema za upravljanje mrežom prenose na elemente mreže kod kojih je došlo do promene parametara QoS-a;

– mreža menja stanja koja su uticala na degradaciju ili postavlja zahteve (selektuje nedegradirane puteve, čvorove ili druge elemente) za novu vezu sa definisanim QoS-om.

Procedura korekcije kvaliteta svodi se na uspostavljanje određenog virtuelnog kanala ili virtuelnog kanala koji poseduje potreban kvalitet.

### Literatura:

- [1] International Telecommunication Union: Terms and definition related to quality of service and network performance including dependability, ITU-T Recommendation E.800, august 1995.
- [2] International Telecommunication Union: ITU-T Recommendation X. 902, november 1995.
- [3] Amitava Dutta-Roy: The cost of quality in Internet - style networks, IEEE Spectrum, september 2000.
- [4] Katsuyoshi Lida, Kenji Kawahara, Tetsuya Takine: Performance Evaluation of the Architecture for End-to-End Quality-of-Service Provisioning, IEEE Communications Magazine, April 2000.
- [5] International Telecommunication Union: Definition of categories of speech transmission quality, ITU-T Recommendation G.109, september 1999.
- [6] D. De Vleeschauwer, J. Janssen, G. H. Petit, F. Poppe: Quality Bounds for Packetized Voice Transport, Alcatel Telecommunications Review, 1st Quarter 2000, pp. 19-23.
- [7] M. J. C. Buchli, D. De Vleeschauwer, J. Janssen, G. H. Petit, A. Van Moffaet: Quality of calls transported over a DSL access network, Alcatel Telecommunications Review 2-nd Quarter 2001, pp. 111-115.
- [8] Walter J. Goralski: Introduction to ATM networking, McGraw-Hill Inc., San Francisco, 1995.

**Krsta Brčić,**  
dipl. inž.  
Tehnički opitni centar KoV,  
Beograd

## **PRIMER SISTEMA ZA UPRAVLJANJE OPREMOM NA AUTOMATIZOVANIM VEŽBOVNIM POLIGONIMA NA BAZI PROGRAMABILNIH KONTROLERA I PERSONALNOG RAČUNARA**

UDC: 623.593:65.011.56:681.322

### *Rezime:*

*U članku se razmatra primena PLC modula povezanih sa personalnim računarom za realizaciju sistema za upravljanje opremom na automatizovanim vežbovnim poligonima. PLC moduli su projektovani za nepovoljne uslove radne sredine u industrijskim pogonima. Personalni računar može biti osnova za rešavanje najrazličitijih problema automatskog upravljanja. Tako nastaju ekonomična rešenja sistema za nadzor i upravljanje. Radi ilustracije prikazan je primer sistema za upravljanje metama na pešadijskom strelištu.*

*Ključne reči: sistem za upravljanje, personalni računar, programabilni kontroler, vežbovni poligon, upravljanje metama.*

---

## **EXAMPLE OF A PC-PLC BASED EQUIPMENT CONTROL SYSTEM IN AUTOMATED TRAINING AREAS**

### *Summary:*

*The topic of this paper is using the programmable logic controller (PLC) connected with a PC in order to control equipment in training areas. PLCs are typically designed to withstand high amounts of impact and vibration in industry. Personal computer technology is an extraordinary powerful platform for innovators in finding the solution to the problem of automatic control. Such systems can provide economical fullfeatured monitoring and control solution. In order to explain the problem, we will show one example of a target control system in an infantry training area.*

*Key words: control system, personal computer, programmable logic controller, infantry training area, target control system.*

---

### **Uvod**

Danas se u velikom broju industrijskih pogona već masovno koriste sistemi i elementi sistema za upravljanje procesima na bazi mikroprocesorskih modula, odnosno industrijskih računara modularne strukture. Ranih osamdesetih godina otpočela je značajna upotreba programabilnih logičkih kontrolera (PLC – Programming Logic Controller) u industrijskim pogonima. Prvobitno namenjeni da zamenjuju složene relejne sklopove,

danas su dostigli takav nivo razvoja da obavljaju veoma složene funkcije obrade procesnih veličina, kontrole i komunikacije sa drugim uređajima u sistemu upravljanja industrijskim procesima. Ovi uređaji dostigli su masovniju primenu zahvaljujući tome što koriste elemente arhitekture mikror računara tako da imaju modularnu hardversku strukturu, veoma su robustni, otporni na vibracije i prljavštinu. U vrlo velikom broju slučajeva (do 80%) oni zadovoljavaju složene zahteve jednog kola kontrole, a preko modula za

komunikaciju mogu se povezivati sa nadređenim delovima sistema (a to mogu biti personalni računari – PC). Zapravo, PC su već više od dvadeset godina u sistemima za upravljanje industrijskim postrojenjima i procesima, a zbog pogodnih karakteristika (npr. vizuelnih prikaza) pokazali su se dovoljno dobrim u sistemima upravljanja, naročito sa stanovišta rada operatora. Danas PC imaju brojnu hardversku i softversku podršku za najrazličitije primene, kao i mogućnost za komercijalnu i profesionalnu komunikaciju sa mnogo uređaja (standardizacija na nivou komunikacije i primene sistemskog softvera). Može se reći da je izražena potreba za upravljanjem industrijskim procesima primenom PC računara uz dodatke koji su prilagođeni objektu upravljanja (kao što su PLC moduli). Na taj način PC zamenjuju specijalne i skupe računare, a, zahvaljujući dobrim karakteristikama, hardverskoj i softverskoj podršci velikog broja proizvođača, čine dobru osnovu za savremene merno-upravljačke sisteme [1]. Moguće je da se primenjuju za tehničke sisteme na vežbovnim poligonima koji se mogu uporediti sa industrijskim pogonima (ne samo po strukturi i funkciji, već i prema radnim uslovima okoline). Radni uslovi mogu biti, u nekim slučajevima, odlučujući za izbor tipa procesne opreme. PLC su projektovani za rad u teškim radnim uslovima, a PC može biti u komandnoj prostoriji i nije neophodno da bude posebno prilagođen industrijskim uslovima rada.

Danas mnogi proizvođači nude opremu [7, 8], tehnička rešenja i programske pakete za nadzor i upravljanje procesima, koji podržavaju veliki broj raspoloživih programabilnih kontrolera i omogućavaju priključenje druge opreme vodećih svetskih proizvođača. Pored

osnovnih funkcija prikupljanja podataka i upravljanja, ova oprema ima i mogućnost povezivanja u mrežu, sekvencijalno vođenje, statistički nadzor, vremensko izvođenje programa, PID regulacije, uvođenje dodatnih korisničkih programa i drugo.

## Definisanje problema

Ukoliko se posmatraju postupci markiranja i imitacije koji se izvode na poligonskim vežbama u osnovnoj jedinici (tabela 1), može se uočiti da se radi o kompleksnim nastavnim aktivnostima koje se izvode uz pomoć složenih tehničkih sredstava.

Markiranje je nastavna aktivnost kojom se na terenu predstavlja i obeležava raspored snaga suprotne strane, simuliraju aktivnosti, radnje i postupci suprotne strane uz pomoć meta, lutki, maketa (oruđa, borbenih i neborbenih vozila), silueta aviona i helikoptera, uređaja za upravljanje metama i dr. Imitacijom se dočarava dejstvo sopstvenih borbenih sredstava, ali i sredstava suprotstavljene strane. Svako korišćeno sredstvo, tj. komplet opreme, ima jasno definisane fizičke elemente, funkcije, relacije i uslove koji čine sistem, a njime se upravlja kako bi se ostvarila namena. Dakle, postoji sve ono što definiše pojam upravljanog sistema (mehanička kretanja, detekcija stanja, detekcija događanja, razna dejstva i efekti), tj. procesa koji se može opisati matematičko-logičkim relacijama. Isto tako, može se uočiti da se vrši upravljanje uređajima korišćenih tehničkih sredstava (ručno, programirano, itd.). Kod svakog od kompleta opreme, ako je predviđen da bude upravljan, može se prepoznati: komandni pult KP (ili komandni uređaj KU) i uređaji kojima se

Markiranje i imitacija na vežbama

Markiranje			Imitacija		
Vreme izvođenja	Način organizovanja	Upotrebljena sredstva	Odnos snaga	Način izvođenja	Upotrebljena sredstva
1. Danju	1. Linijski	1. Lutke	1. ČVG-BVG	1. Na cilju	1. Imitator dejstva artiljerijskih oruđa IDAO M87
2. Noću	2. Prostorno	2. Makete	2. ČPOG-ČPOG	2. Na vatrenom položaju	2. Imitator nuklearne eksplozije INE M78
3. Kombinovano	3. Kombinovano	3. Siluete		3. Kombinovano	3. Imitator hemijskog udara IHU BM78
		4. Komplet opreme pešadijskog strelišta (KOPS)			4. Imitator IZBS M4
		5. Komplet opreme radio strelišta (KORS)			

upravlja (za simulaciju borbenog poretka, pokretanje meta i silueta, imitaciju efekta vatre, itd.). Pored toga, na pultovima postoji signalizacija stanja uređaja. Upravljanje ovom opremom može se posmatrati kao centralizovan sistem za prikupljanje podataka, nadzor, praćenje i upravljanje procesa sa prostorno raspoređenim elementima.

Elementi za pokazivanje stanja (senzori, merači, davači i sl.) i izvršni uređaji čine primarne delove sistema i nalaze se uz sam proces koji se prati i upravlja. Prikupljanje podataka i upravljanje, za prostorno raspoređene uređaje koji čine funkcionalnu celinu, vrši se centralizovano – s jednog mesta. Prostorno raspoređeni delovi sistema mogu da imaju, i korisno je da imaju, pored mernih elemenata, davača signala i pogona (napr. elektromotorne), i pojedine delove sistema za upravljanje, tj. pojedini delovi sistema za upravljanje treba da budu postavljeni „uz sam proces“ kojim se upravlja sa centralnog mesta.

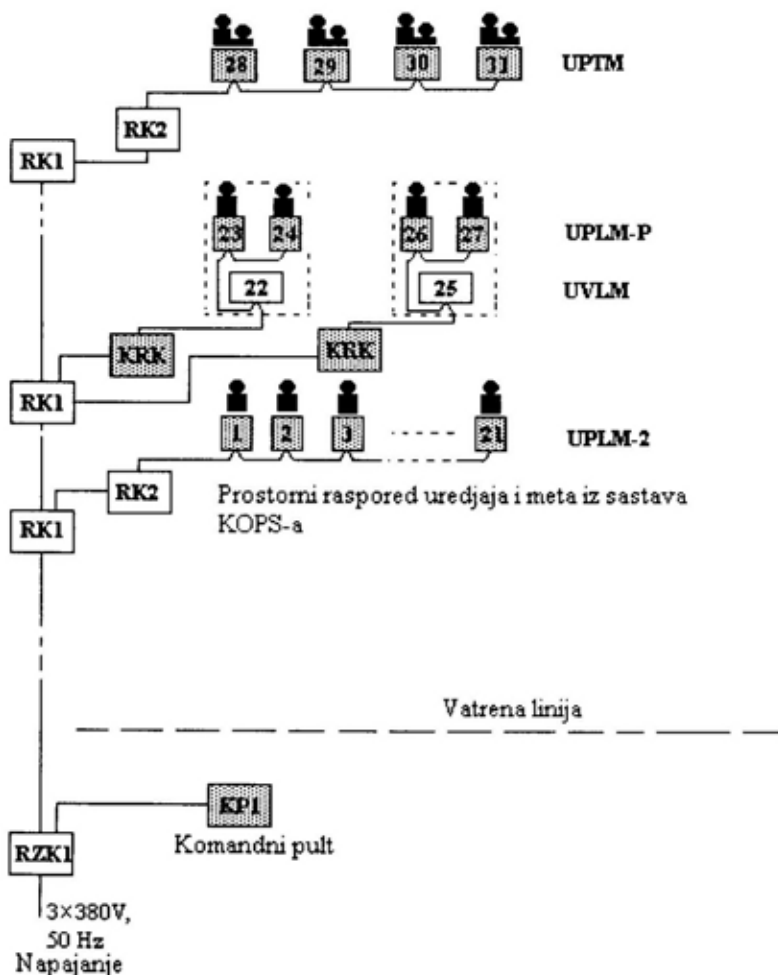
Komplet opreme pešadijskog strelišta (KOPS) jedan je od kompleta opreme iz skupa sredstava za markiranje koji će se razmatrati kao objekat sistema za

upravljanje, uz ukazivanje na jedno od mogućih rešenja problema upravljanja primenom programabilnih kontrolera i personalnog računara. KOPS se sastoji od prostorno raspoređenih uređaja za pokretanje meta i indicaciju, kojima se upravlja sa komandnog pulta (slika 1).

### Prikaz mogućeg rešenja

Komplet opreme pešadijskog strelišta sa funkcijama pokretanja meta i pokazivanja pogodaka treba da se nadzire i upravlja sa komandnog pulta. Postojeći sistem KOPS-a je zastareo. Kao novo rešenje sistema za upravljanje ovim sredstvom razmatraće se primena PLC i personalnog računara. Pri tome se neće analizirati optimalnost izabranog rešenja već samo njegova pogodnost kao eventualno prihvatljivo rešenje. Takvim rešenjem bi se dobio savremen sistem za nadzor, praćenje i upravljanje, kakav se danas koristi u mnogim industrijskim pogonima. Dakle, koristili bi se PLC, kao dislocirani upravljački uređaji (predviđeni za rad u poljskim uslovima) i PC koji je smešten u delimično zaštićenim uslovima okoline, kao centralni upravljački uređaj





Sl. 1 - Komplet strelišne opreme KOPS:

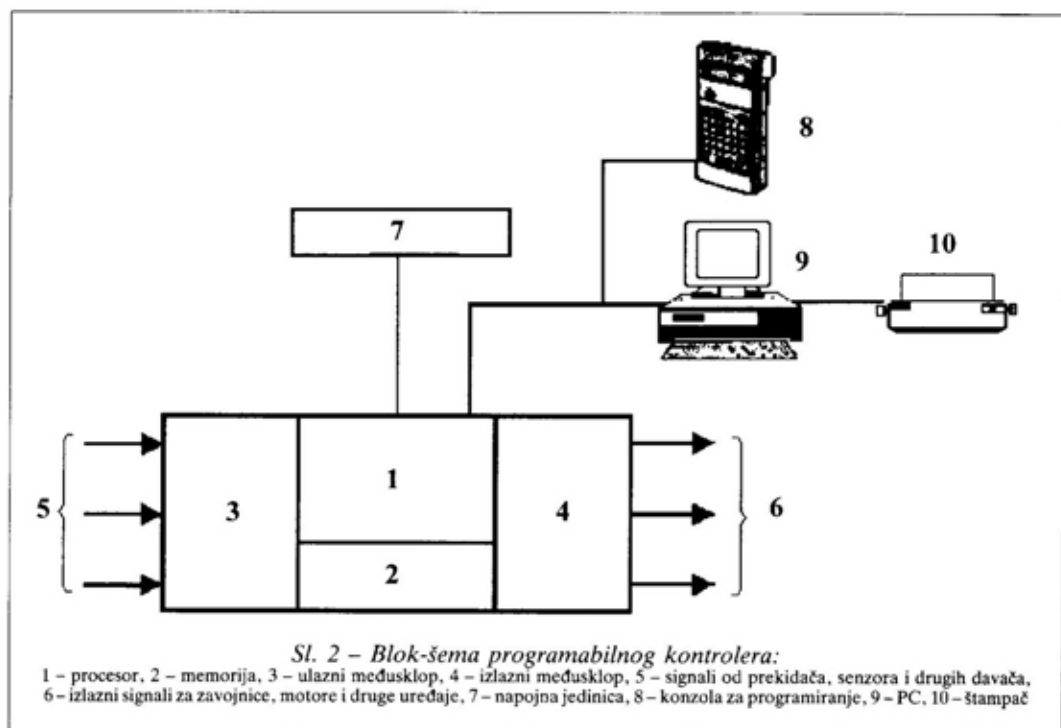
KP - komandni pult, RZK - razvodno-zaštitna kutija, UPLM-2 - uređaji za pokazivanje lakih meta, UVLM - uređaji za vuču lakih meta, UPLM-P - uređaji za pokazivanje lakih meta koji se postavljaju na UVLM, UPTM - uređaji za pokazivanje teških meta, RK1 - razvodna kutija 1, RK2 - razvodna kutija 2, KRK - komandno-razvodna kutija

sa odgovarajućim dodacima. Takav sistem omogućavao bi operatoru jednostavan nadzor procesa, razne intervencije i eventualnu vezu sa drugim sličnim ili istim sistemima.

U daljem tekstu dat je kraći prikaz PLC kontrolera i personalnih računara u sistemima za upravljanje.

*Programabilni kontroler i personalni računar u sistemima za upravljanje*

Programabilni kontroleri su od samog početka bili projektovani za industrijsku primenu (robustni u pogledu mehaničke izdržljivosti, nemaju memoriju sa pokretnim delovima, imaju precizno



definisane funkcije pri „hladnom i vrućem restartu“) i obično funkcionišu u tzv. realnom vremenu, imaju specifične dijagnostičke funkcije i dr. Uvođenjem programabilnih kontrolera nije promenjena logika rešavanja problema automatizacije industrijskih procesa, ali je njihovo korišćenje olakšalo realizaciju i skratilo vreme potrebno za realizaciju zadataka automatizacije. Njihova odlika je da se relejne šeme realizuju programski, pri čemu je zadržana logika relejne šeme, a uz to može da sadrži i druge elemente sistema za upravljanje.

PLC se sastoji od centralne procesorske jedinice, memorije, električnih kola za prijem podataka, električnih kola za slanje podataka i dodatnih električnih kola (slika 2).

PLC se može posmatrati kao kutija ispunjena relejima, brojačima, generatorima vremenske baze i memorijskim pro-

storom, pri čemu većina ovih komponenti, kao što su releji fizički ne postoje već su softverski simulirani. Uređaj kao celina funkcioniše tako što se neprekidno izvršava program: očitavanje ulaznih stanja (podataka), izvršavanje programiranih instrukcija i upisivanje izlaznih stanja (podataka na osnovu kojih se deluje na elektromotorne i druge pogone upravljačkog sistema). To se ciklično ponavlja, pri čemu trajanje ciklusa zavisi od brzine i sastava PLC, a kreće se od nekoliko  $\mu$ s i manje do nekoliko milisekundi i više. Naravno, postoji i niz drugih funkcija, kao što su komunikacije sa drugim kontrolerima i dr.

U današnjim uslovima PLC može biti povezan sa PC (slika 2). Pri tome PC može poslužiti kao konzola za programiranje, ali i kao nadređeni kontroler. Naime, ako je (a u ovom primeru to jeste), pored samo upravljačkih zadataka, po-

trebno obavljati i druge funkcije, kao što su obrada podataka, umrežavanje i vizuelni prikazi, treba projektovati sistem za upravljanje na bazi PC (PC-based Control), što posebno važi ako je već na raspolaganju personalni računar (po mogućstvu u industrijskoj izvedbi), a raspoloživi operativni sistem Windows 95, 98 ili NT. Programiranje upravljačkog algoritma može se izvesti uz korišćenje nekog od viših programskih jezika ili programskog jezika za PLC koji radi na PC. Treba pomenuti da upravljanje na bazi personalnog računara nije isto što i upravljanje pomoću personalnog računara koji sadrži programabilne kontrolere u obliku dodatih PCI kartica. Inače, u praksi se mogu sresti sledeće kombinacije:

- personalni računar vrši kompletno upravljanje,
- programabilni kontroler povezan sa programabilnim pokazivačem i konzolom vrši kompletno upravljanje,
- personalni računar ima ulogu centralnog uređaja, a dislocirane funkcije upravljanja vrše programabilni kontroleri.

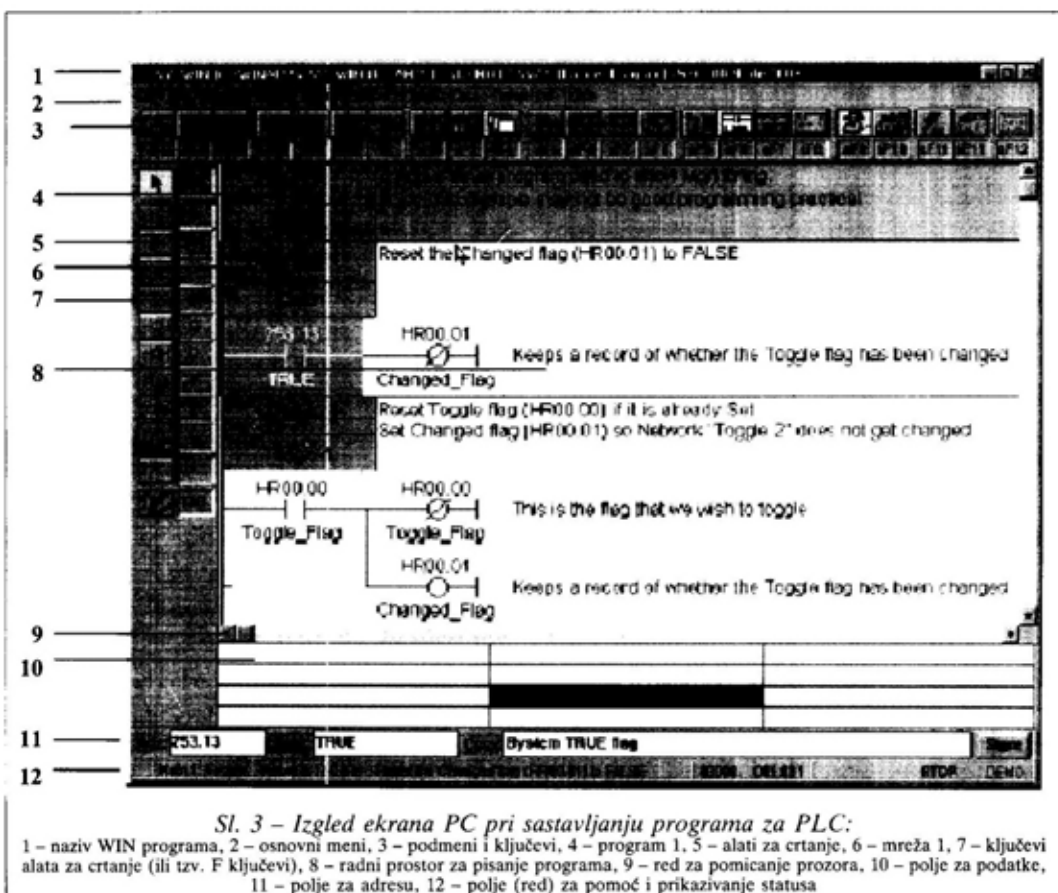
*Softverska podrška za programabilne kontrolere i personalne računare u sistemima za upravljanje*

Program za rad, tj. relejna šema programabilnog kontrolera može se uneti u memoriju kontrolera na više načina. Jedan od načina je da se unosi preko konzole (tastature) za programiranje, koja ima ulogu linijskog editora, sa ugrađenim protokolom za komunikaciju. Za kodiranje relejne šeme u obliku programskih simbola (mnemonička) postoje pravila koja pokrivaju sve strukture dijagrama. Ipak, kod programa sa složenim grananjem šeme, to prevođenje može biti

složeno, a zbog nepreglednosti programa moguće su i greške koje je teško otkriti. Za ovo se mogu koristiti standardni programski jezici (ASSEMBLER, C, itd.), ali su razvijeni i posebni programski jezici i programski paketi koji mogu biti (prema IEC 1131) u obliku teksta, kao što su liste instrukcija (IL – Instruction List) i struktuiranog teksta (ST – Structured Text), ili grafičkih simbola električnih kola sa relejima (Ladder Diagram – LD), simbola sekvencijalnih kola (SFC – Sequential Function Chart) i funkcionalnog blok-dijagrama (FBD – Function Block Diagram).

Proizvođači, od kojih su kod nas najzastupljeniji Siemens i Omron, nude programske pakete za programiranje programabilnih kontrolera i izradu računarskih programa za upravljanje, praćenje i nadzor industrijskih procesa, koji rade pod DOS-om ili pod WINDOWS okruženjem. Organizacija programa je u obliku blokovskih struktura uz mogućnost pisanja komentara, tako da se može deliti na logičke celine. Standardne „clipboard“ procedure manipulacije ovim blokovima, kao i kompletnim programima olakšavaju rad (inicijalizacija kontrolera, programiranje reakcije na sistemske alarme i sl.). Softverski alati za sastavljanje i pisanje programa za upravljanje procesima, kao i alati za ostale operacije, omogućavaju pristup iz menija, a na ekranu postoje i paneli sa tasterima, pomoću kojih se na jednostavan i brz način mogu koristiti funkcije ovih programskih paketa (slika 3).

Upisivanje softvera u memoriju kontrolera ostvaruje se na nekoliko načina (u nekoliko modova). Jedan je da se program sastavlja na personalnom računaru, a zatim se prebaci u memoriju kontrolera, odakle se može i očitati [3].



Ovaj način predstavlja programski mod, koji može biti aktivan i u toku rada kontrolera. Pored ove vrste rada (moda) postoji i nadzor rada kontrolera, odnosno monitorski mod, u kojem je moguće nadgledati izvršenje programa, uz ručno postavljanje određenih uslova. Moguće je napraviti listu adresa nad čijim će se sadržajem izvršiti određena operacija, uz istovremeni pregled (monitoring) većeg broja bitova i reči, što omogućava efikasno otklanjanje grešaka u programu (debugging). Konačno, nakon upisivanja programa u memoriju programabilnog kontrolera, sistem se može pokrenuti (raditi u RUN modu). Pored izbora tipa kontrolera, ovaj programski paket ima

mogućnost programiranja kontrolera na početku za rad u različitim tipovima mreža. Moguće je postaviti parametre (set-up) za standardne serijske komunikacije i za parametre potrebne za rad kontrolera u Ethernet mreži. Prema potrebi, ovim podacima je moguće pristupiti u bilo kom trenutku. Ove mogućnosti znatno pojednostavljaju integraciju pojedinačnog kontrolera u mrežu na bilo kom nivou uređaja za automatizaciju. Pored alata za sastavljanje programa i komunikaciju sa kontrolerom postoji i veliki broj dodatnih funkcija. Postoje funkcije za otkrivanje grešaka u programu, kao što su skokovi na nepostojeće lokacije, neispravno programirane petlje, nepravilno napisani

potprogrami ili interapt rutine, itd. Ovi programski paketi pružaju i mogućnost izrade programske dokumentacije u bilo kom obliku: od relejnog dijagrama sa svim komentarima, štampanja liste korišćenih adresa do mnemoničkog zapisa.

Važan segment je i način povezivanja PLC i računara [8] pri čemu se može koristiti više standarda za komunikaciju [9]. U konkretnom slučaju primenljivi su TIA/EIA 422-B i TIA/EIA 485 (RS 485), a mogu se koristiti i drugi koji mogu obezbediti pouzdan prenos podataka sa malim brojem linija, na daljine koje su veće od 1 km.

### Prikaz traženih funkcija KOPS-a

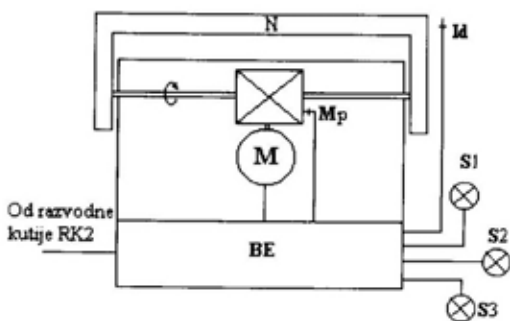
Osnovni skup komandi čine komande za način funkcionisanja kompleta (UKLJ. STRELIŠTA, RUČNO, AUTOMATSKI, OCENI, DEBLOKIRAJ) i komande koje se neposredno odnose na uređaje za pokazivanje meta (PODIGNI, SPUSTI), i uređaje za vuču meta (NAPRED, NAZAD, STOJ). Skup signala koji prati izvršavanje komandi i tok programa dolazi sa graničnih prekidača kraja hoda meta, graničnih prekidača kraja hoda kolica za vuču meta, električnog kola za detekciju pogotka i drugih senzora stanja upravljanih uređaja, prikazuje se na prednjoj ploči komandnog pulta. Pored toga, postoji i signalizacija greške u slučaju da se javi nesaglasnost između zadatog i stvarnog stanja.

Uređajima koji su prostorno raspoređeni na vežbovnom poligonu (strelištu) upravlja se sa komandnog pulta. Uređaji za pokazivanje lakih meta (UPLM), uređaji za pokazivanje teških meta (UPTM) i uređaji za vuču lakih meta (UVLM) pokreću mete izvršavajući zadate komande. Uređaji za pokazivanje meta (UPLM

i UPTM) izvršavaju komande za *dizanje* i *spuštanje* meta i omogućavaju *signalizaciju pogotka*, *imitaciju vatre cilja* i *osvetljenje mete*. Signalizacija pogotka se obavlja na osnovu signala od inercionog davača koji reaguje na pogodak mete. Na osnovu signala pogotka pali se signalna sijalica na uređaju i meta se spušta dole. Uređaj se u tom trenutku automatski blokira, tj. onemogućeno je zadavanje drugih komandi dok se sa komandnog pulta ne zada komanda OCENA.

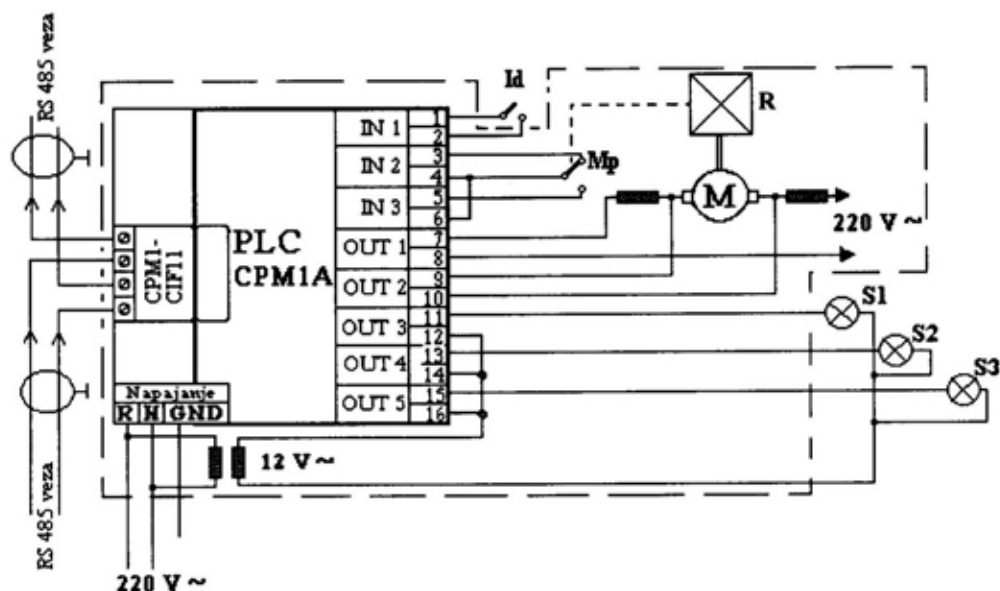
Uređaji UPLM i UPTM imaju iste funkcije, ali im se neznatno razlikuju električne šeme veza bloka releja i elektronike koji je smešten u kućište uređaja (zbog čega se ne mogu međusobno zamenjivati). Na uređaj UPTM mogu se postaviti i druge mete (po obliku, masi i vrsti indikatora pogotka) ako ovaj uređaj može da ih pokreće, kao npr. metu koja predstavlja siluetu helikoptera [5]. Na slici 4 može se videti broj ulaza (signala stanja upravljanog uređaja) i broj izlaza (upravljačkih signala) iz bloka releja i elektronike uređaja, odnosno PLC i funkcije uređaja UPLM i UPTM.

Za uređaje UPLM i UPTM (da bi zamenili postojeći zastareli blok elektro-



Sl. 4 – Blok-šema uređaja za pokazivanje meta UPLM:

BE – blok elektronike i releja (PLC), M – elektromotor, R – reduktor, N – nosač (držač) mete, Id – inercioni davač pogotka, Mp – mikroprekidač kraja hoda mete, S1 – signalna sijalica za signalizaciju pogotka, S2 – sijalica za imitaciju efekta vatre cilja, S3 – reflektor za osvetljenje mete



Sl. 5 – Princip električne šeme povezivanja PLC u uređajima UPLM i UPTM:

PLC – programabilni kontroler, CPM1-CIF11 – konverter RS 485 na spoljni priključak CPM1, Mp – mikroprekidač kraja hoda mete, Id – inercioni davač pogotka, M – elektromotor, R – reduktor, S1 – signalna sijalica za signalizaciju pogotka, S2 – sijalica za imitaciju efekta vatre cilja, S3 – reflektor za osvetljenje mete

nike i releja) potreban je programabilni kontroler sa dva ulaza, pet izlaza (ako se zadrže postojeći releji za elektrodinamičko kočenje potrebna su četiri izlaza), potrebnim brojem instrukcija za realizaciju komandi koje se prenose sa komandnog pulta, dovoljno memorije za program koji programabilni kontroler treba da izvrši i ima komunikacioni interfejs za povezivanje sa personalnim računarom, odnosno komandnim pultom. Prema ovome i raspoloživom prostoru za ugradnju, kao zadovoljavajuće rešenje može se uzeti minijturni PLC kakav je CPM1A – 20CDR-A koji proizvodi Omron. On je malih dimenzija i ima 12 ulaznih priključaka i 8 izlaznih priključaka, a može se koristiti onoliko ulaza i izlaza koliko je potrebno. Tipičan broj ulaza i izlaza za ovaj PLC je 10, 20, 30 i 40 sa mogućnošću proširenja do 100 [6].

Princip električne šeme povezivanja PLC prikazan je na slici 5 (na slici nisu navedene originalne oznake priključaka).

Izlazni priključci mogu biti relejni ili tranzistorski sa nezavisnim napajanjem, s tim što se za uključivanje elektromotornog pogona moraju koristiti posebni uklopni elementi (jer se izlazi ne mogu opterećivati sa više od 0,5 A). Inače, CPM1A ima programsku memoriju od 2K, memoriju za podatke od 1K, 91 instrukciju i 28 generatora vremenske baze i brojača sa rezolucijom od 10 ms, što zadovoljava broj sekvenci programa i broj instrukcija po svakoj sekvenci programa za upravljanje uređajima iz sastava KOPS-a. Vreme izvršenja osnovnih instrukcija je 0,72  $\mu$ s, što je znatno iznad potreba da se zadovolji izvršavanje pojedinih sekvenci upravljanja, čije je minimalno trajanje 5 s.

Iz Uputstva za KOPS [10] može se videti i način povezivanja bloka releja u komandno-razvojnoj kutiji KRK za uređaj za vuču lakih meta UVLM na koji se može postaviti jedan ili dva uređaja UPLM, što omogućava (uz pomoć bloka releja u komandno razvodnoj kutiji KRK) lokalno upravljanje i upravljanje i praćenje funkcije ovog uređaja sa komandnog pulta. Komandama NAPRED, NAZAD i STOJ pokreću se kolica, a na komandnom pultu se signalizira kretanje i položaj kolica: *napred, nazad, početak, kraj*. Za ovaj uređaj električna šema povezivanja PLC je jednostavnija. Zahtevaju se dva ulaza (za signalizaciju početka i signalizaciju kraja hoda kolica) i dva izlaza (jedan za pokretanje kolica napred i jedan za pokretanje kolica nazad).

Napajanje uređaja iz sastava KOPS-a ne mora se menjati pri ovoj dogradnji i zameni delova. Inače, napajanje se obavlja preko razvodno-zaštitne kutije RZK, koja ujedno povezuje komandni pult sa ostalim delovima opreme iz sastava kompleta. Dalji razvod napona za napajanje, komandnih signala i signala stanja vrši se preko razvodnih kutija RK1, razvodnih kutija RK2 i komandno-razvodnih kutija KRK. Razvodna kutija RK1 ima šest priključaka za uređaje za pokazivanje meta (UPLM i UPTM), dva priključka za uređaje za vuču lakih meta (UVLM) i dva priključka na koje se priključuju kablovi za sledeću razvodnu kutiju. Razvodna kutija RK2 je jednostavne konstrukcije i služi za priključivanje uređaja za pokazivanje meta na RK1. Komandno-razvodna kutija KRK obezbeđuje napajanje, lokalno upravljanje i daljinsko upravljanje uređaja UVLM, a priključuje se na RK1.

## Izbor rešenja

Na osnovu prikazanih funkcija i razmatranja u okviru definisanja problema i delimične primene postojećeg rešenja (elektromotorni pogon, lokalna signalizacija i imitacija vatre) može se sastaviti algoritam upravljanja, izabrati potreban hardver i sastaviti softver za sistem za upravljanje kompletom opreme pešadijskog strelišta na bazi programabilnih kontrolera i personalnog računara, gde bi se programabilni kontroleri koristili kao prostorno raspoređeni delovi sistema, a personalni računar kao centralna upravljačka jedinica (komandni pult). Ovako rešen sistem za upravljanje ima skromne zahteve u pogledu ožičenja i održavanja, kao i mogućnost memorisanja i obrade velikog broja podataka, što je značajno za zadovoljenje sve većih potreba savremenih vežbovnih poligona. Pored toga, mogu se lako dograđivati i povezati sa drugim sistemima za praćenje, nadzor i upravljanje.

Broj i sadržaj funkcija ovakvog rešenja sistema za upravljanje kompletom opreme za pešadijsko strelište ne samo da može već i mora biti veći od onih koje sada ima KOPS. Pri tome, da bi se pojednostavila njegova upotreba, funkcije ovakvog sistema treba podeliti na tri dela (režima rada). To su: PRIPREMA, RAD i OBRADA REZULTATA.

Deo funkcija sistema PRIPREMA obuhvatio bi samu pripremu za rad, i to: proveru ispravnosti (samotestiranje) sistema i unošenje, ažuriranje i prikazivanje podataka (prostorni raspored meta, program gađanja, imena strelaca i dr.).

Deo funkcija sistema RAD činio bi osnovnu grupu funkcija, kao što su: zadanje komandi, izvršavanje komandi, signalizacija stanja po zadatoj komandi, sig-

nalizacija pogotka i registrovanje pogodaka. Ova grupa funkcija, kao i kod postojećeg rešenja, može se izvoditi RUČNO, PROGRAMSKI i po PROGRAMU korak po korak.

OBRADA REZULTATA GAĐANJA obuhvatila bi: obradu broja registrovanih pogodaka primenom standardnih programskih paketa prema postojećim pravilima gađanja, izradu protokola gađanja i sl.

Izbor režima rada (PRIPREMA, RAD, OBRADA) može se rešiti, na primer, preko funkcijskih tastera personalnog računara ili preko grafičkog interfejsa tako što će se pomeriti oznaka (kursor) na ekranu i poklopiti sa odgovarajućom sličicom sa ispisanim tekstom. Pokretanje programa, aktiviranje neke funkcije ili zadavanje komande sa komandnog pulta može se rešiti preko grafičkog interfejsa ili sa tastature. Svi režimi rada i funkcije moraju biti prikazani grafički, tekstualno i numerički na ekranu u svim režimima rada. Sve opise funkcija upravljačkog sistema treba prevesti u odgovarajući oblik da bi se one mogle i izvršavati. Naime, realizacija digitalnih sistema upravljanja određene strukture, zadatih funkcija i pravila upravljanja podrazumeva da se elementi arhitekture i programiranja mikroprocesora i mikror računara, u šta spadaju i razmatrani uređaji, posmatraju kao komponente za izvršenje određenih funkcija u sistemu upravljanja [2].

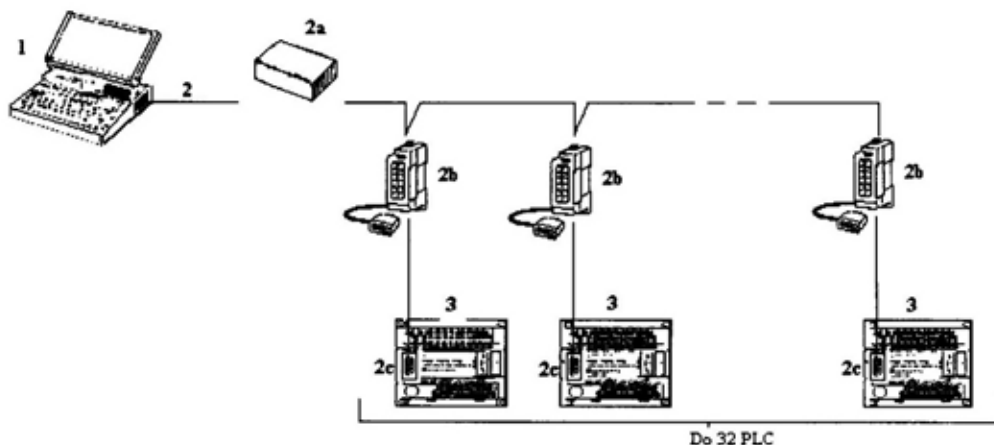
U praktičnom smislu, ako bi se ovakav sistem realizovao, moraju se slediti pravila za razvoj sistema. To znači da se uradi matematičko-logički opis upravljanog sistema, definišu zahtevi za upravljačke funkcije i sastavi algoritam upravljanja (dijagram toka). Zatim se određuju ULAZI (signali koji odražavaju stanje upravljanog sistema) i IZLAZI (uprav-

ljački signali) dislociranih delova i centralnog dela upravljačkog sistema, odnosno određuje konfiguracija hardvera. Nakon upoznavanja opisa funkcija i fizičkog dela sistema (hardver) pristupa se pisanju programa, tj. izradi relejnih šema za programabilne kontrolere, programa za personalni računar kao centralne jedinice i protokola za komunikaciju. Nakon unosa programa u memorije programabilnih kontrolera, koji su odabrani prema broju i vrsti funkcija koje treba da obavljaju i unosa programa u memoriju personalnog računara (ako program već nije na njemu razvijen), preostaje da se još jednom proverí napisani program, da se izvrši simulacija (ako ima uslova), proverí da li su provodnici pravilno priključeni prema utvrđenim i obeleženim brojevima ulaza i brojevima izlaza i, konačno, da se sistem pusti u probni rad.

Na slici 6 data je skica povezivanja uređaja PLC tipa CPM1A sa centralnim uređajem, tj. računarom koji ima ulogu komandnog pulta. Programabilni kontroler CPM1A je malih dimenzija, ima odgovarajući broj ulaza i broj izlaza i nema visoke zahteve za programiranje. Za programiranje se može koristiti programski paket SYSWIN 3.4 ili kompleksniji Cx Programmer istog proizvođača (Omron).

Konfiguracija hardvera računara bira se prema podacima za programabilni kontroler, broju i složenosti funkcija u pogledu upravljanja i komunikacije, kao i zahteva upotrebljenog programskog paketa za programiranje i rad programabilnih kontrolera. U konkretnom slučaju zahtevi programskog paketa za programiranje programabilnih kontrolera i za rad personalnog računara kao upravljačke jedinice znatno su obimniji od ostalih zahteva, i relevantni su za izbor konfiguracije personalnog računara. Prema ovome, mi-





Sl. 6 – Skica povezivanja PLC tipa CPM 1A na PC:

1 – PC, 2 – RS 232C kabl, 2a – konverter RS 232C na RS 485, 2b – konverter RS 485 na spoljni priključak kontrolera, 2c – spoljni priključak kontrolera, 3 – PLC CPM 1A (strana sa priključcima za: napajanje, spoljnu vezu, ulazne signale i izlazne signale)

nimalni zahtevi su da personalni računar ima:

- CPU klase Pentium na učestanosti većoj od 90 MHz,
- najmanje 16 MB RAM-a,
- najmanje 40 MB slobodno na HD,
- SVGA rezulucije 800×600 ili više,
- instaliran MS WINDOWS 95, 98 ili NT 4.0.

Pored toga, za svaki korak programa za programabilni kontroler treba rezervirati još po 1 K memorijskog prostora na hard disku i RAM memoriji.

Za upravljanje i komunikaciju u personalni računar treba ugraditi odgovarajuću komunikacionu karticu ili odgovarajući adapter za komunikaciju. Prema udaljenosti prostorno raspoređenih uređaja u odnosu na komandni pult moguće je opredeliti se za komunikacioni interfejs i medijum RS 485 (do 1200 m) ili neko drugo rešenje (npr. modemska komunikaciju) za veće daljine.

Što se tiče robustnosti može se izabrati standardna verzija personalnog računara, LAPTOP ili industrijska verzija

personalnog računara, već prema uslovima eksploatacije (kabinetski ili terenski).

### Zaključak

Intenzivan razvoj računarske tehnologije i prenosa informacija omogućio je kvalitativno novi pristup problemu upravljanja procesima. Razmatrano rešenje sistema za upravljanje kompletom opreme pešadijskog strelišta (KOPS) na bazi programabilnih kontrolera i personalnog računara (PC), predstavlja savremeni sistem koji zadovoljava ulove za rad prostorno raspoređenih uređaja i u poljskim uslovima, kao i rad komandnog pulta u delimično zaštićenim uslovima (komandna soba, kabina, šator i sl.). Ovo rešenje relativno je jednostavno, a može se brzo realizovati tako što će se:

- kompletan sistem praćenja i upravljanja razložiti na module;
- komandni pult bazirati na PC, a moduli na PLC i smestiti neposredno uz

delove procesa (smanjujući troškove ožičenja, povećati pouzdanost funkcionisanja i pojednostaviti održavanje);

– prostorno raspoređenim PLC modulima dodeliti funkcije upravljanja, prikupljanja i obrade ulaznih signala, ažuriranje izlaza, itd.;

– moduli povezati tako da „komuniciraju“ međusobno i sa višim nivoom u hijerarhiji automatizacije procesa, preko jeftinog medijuma (dvožični provodnik);

– ceo sistem projektovati u otvorenoj arhitekturi, uz mogućnost jednostavnog dodavanja modula i njihovog priključenja na magistralu podataka.

#### Literatura:

- [1] Drndarević, V.: Akvizicija mernih podataka pomoću personalnog računara, Mikroelektronika, Beograd 2001.
- [2] Stojić, M. R.: Digitalni sistemi upravljanja, Naučna knjiga, Beograd, 1989.
- [3] Uputstvo: User Manual – Softwer Programming Tool for OMRON Programmable Logic Controllers, Ver. 3.4, Published October, 1999.
- [4] Radošević, M.: Markiranje i imitacija na vežbama u osnovnoj jedinici, Vojni glasnik 6/1987.
- [5] Rodić, V.: Meta – helikopter, Vojni glasnik 2/1986.
- [6] Katalog: Selektion Guide To Programmable Controllers, Omron Cat. No X210-E1-SN, Singapore 1999.
- [7] Katalog: Omron katalog proizvoda, Mikrokontrol – Beograd 2001.
- [8] Mikrokontrol: Omronov programski paket CX Automation Suite – odgovor novom vremenu, časopis Mikroelektronika maj/jun 2001.
- [9] Dokić, A.: Uporedni prikaz standarda za prenos podataka, časopis Mikroelektronika maj/jun 2001.
- [10] Dimitrijević, B. Đudić, S.: Uputstvo kompleta opreme pešadijskog strelišta, Vojnoizdavački zavod, Beograd, 1976.

### Uvod

U članku „Satelitski sistem za globalno pozicioniranje – GPS“ koji je objavljen u Vojnotehničkom glasniku broj 4–5/2000 opisan je sistem za globalno pozicioniranje koji je razvijen u SAD pod imenom GPS ili NAVSTAR. Sličan sistem, poznat pod nazivom GLONASS (ГЛОБАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА), razvijen je u Ruskoj Federaciji.

Prvi satelit sistema GLONASS lansiran je 12. oktobra 1982. godine. Do 1985. godine lansirano je 10 satelita tzv. Bloka I. Od 1985. do 1986. godine lansirano je 6 satelita Bloka IIa, kod kojih je poboljšana preciznost i stabilnost etalona frekvencije (vremena). Dvanaest satelita Bloka IIb lansirano je u 1987. i 1988. godini. Od 1989. godine pa do danas lansiran je 51 satelit Bloka IIc. U pripremi su sateliti bloka GLONASS M, koji imaju znatno poboljšane osobine u odnosu na svoje prethodnike [3]. Do danas nije lansiran nijedan od satelita ovog bloka. Iako je planirano da se puna funkcionalnost sistema ostvari do 1991. godine, GLONASS je službeno proglašen operativnim dekretom koji je predsednik Ruske Federacije potpisao 24. septembra 1993. godine, tek su u januaru 1996. godine svih 24 satelita prvi put postali operativni.

### Opis sistema GLONASS

GLONASS se sastoji od tri segmenta: svemirskog, kontrolnog i korisničkog.

*Svemirski segment* čine 24 satelita koji se nalaze u približno kružnim orbitama oko Zemlje, na visini od oko 19 100 km iznad nivoa mora. Sateliti su raspoređeni u tri ravni koje se seku pod uglom od 120°. U svakoj ravni se nalazi 8 ravnomerno raspoređenih satelita, tako da je ugao između susednih satelita u istoj ravni 45°. Prava u kojoj se seku orbitalne ravni zaklapa sa ekvatorijalnom ravni ugao od 64,8°. Svaki satelit napravi pun krug oko Zemlje za 11 sati, 15 minuta i 44 sekunde. Sateliti emituju navigacione radio-sigale na frekvencijama od približno 1,6 GHz (L1 opseg) i 1,2 GHz (L2 opseg). Emituju se dve vrste signala:

– signal standardne tačnosti (SP), čiji osnovni nosilac ima 0,511 MHz, a namenjen je civilnoj upotrebi. U ovaj signal se ne unose nikakve namerno izazvane smetnje;

– signal visoke tačnosti (HP), čija namena je prevashodno vojna. Osnovni nosilac ovog signala ima frekvenciju od 5,11 MHz. Civilna upotreba ovog signala se ne preporučuje bez posebne dozvole Ministarstva odbrane Ruske Federacije. Ovo ministarstvo može promeniti HP-

-kod u bilo kom trenutku bez prethodne najave.

*Kontrolni segment* sastoji se od pet kontrolnih stanica raspoređenih na tlu bivšeg Sovjetskog Saveza. Glavna stanica nalazi se u Golicinu (Moskovski region), a ostale u Sankt Petersburgu, Trnopolju, Jenisejsku i Komsomolsku na Amuru. Kontrolne stanice vrše nadzor nad sistemom. Po potrebi se obavljaju korekcije u orbitalnim parametrima i navigacionim podacima. Dvosmernu komunikaciju sa satelitima ima samo glavna stanica.

*Korisnički segment* čine GLONASS prijemnici.

### **Koordinatni sistem**

Osnovni koordinatni sistem za GLONASS je PZ-90 (Параметри Земли – 1990) CTS koordinatni sistem koji je definisan na sledeći način: centar koordinatnog sistema nalazi se u centru mase Zemlje, Z-osa je usmerena u pravcu Konvencionalnog Zemljinog pola (po preporuci IERS – International Earth Rotation Service), X-osa je paralelna sa presekom ekvatorijalne ravni i nultog meridijana (definisanog od BIH – Bureau International de l'Heure), a Y-osa je tako odabrana da sa X i Z osama čini desni ortogonalni koordinatni sistem. Kako je dato u [1], dužina veće poluose PZ-90 elipsoida iznosi 6 378 136 m, a dužina manje poluose je 6 356 751 m. Iako na zvaničnom GLONASS veb-sajtu [1] nije dat način konverzije iz PZ-90 u WGS-84 koordinatni sistem (i obrnuto) formule za konverziju mogu se naći npr. u [2], zahvaljujući kampanji IGEX (International Glonass EXperiment je obrazovan radi pružanja međunarodne podrške korišćenju GLONASS).

### **GLONASS vreme**

GLONASS vreme upravlja se prema vremenu hidrogenskog časovnika koji

pripada kontrolnom segmentu. Nestabilnost ovog časovnika nije veća od  $5 \cdot 10^{-14}$  sekundi na dan. Cezijumski časovnici na satelitima (svaki satelit ih ima po tri) imaju nestabilnost koja nije veća od  $5 \cdot 10^{-13}$  sekundi na dan. GLONASS vreme žuri 3 sata u odnosu na rusko UTC vreme. Rusko UTC vreme održava se u Glavnom metrološkom centru u Mendeljejevu, u Moskovskom regionu [4]. Ako se izuzme pomeraj od 3 časa, GLONASS vreme prati UTC vreme sa odstupanjem koje nije veće od 1 ms. Uz korišćenje korekcionih podataka koji su sadržani u navigacionim signalima, ovo odstupanje se može svesti na ispod 1  $\mu$ s. GLONASS vremenu dodaju se prestupne sekunde isto kao i UTC vremenu.

### **Princip rada sistema GLONASS**

Princip izračunavanja koordinata GLONASS prijemnika i jedinstvenog vremena isti je kao kod NAVSTAR prijemnika. Na osnovu signala sa najmanje četiri satelita GLONASS prijemnik određuje rastojanje od antena satelita i svoje antene, a zatim i svoje X, Y i Z koordinate u CTS koordinatnom sistemu, kao i jedinstveno vreme. Sateliti emituju radio-sigale na L1 i L2 opsezima. Pri tome se koristi tzv. multipleksiranje sa frekvenčijskom podelom (FDMA – Frequency division multiple access). To znači da svaki od GLONASS satelita ima poseban kanal (opseg frekvencija) i na L1 i na L2 opsegu na kojima emituje signale. Izuzetno, dva satelita mogu emitovati signale na istim kanalima samo ako pripadaju istim orbitalnim ravnima, a nalaze se na 180° udaljeni jedan od drugog, tako da nisu oba istovremeno „vidljiva“ sa Zemlje.

Za SP signal noseće učestanosti kanala ( $f_k$ ) za L1 i L2 opseg dobijaju se po sledećoj formuli:

$$f_k = f_0 + k \cdot \Delta f$$

gde je  $f_0 = 1602$  MHz,  $\Delta f = 562,5$  kHz za L1 opseg, ili  $f_0 = 1246$  MHz,  $\Delta f = 437,5$  kHz za L2 opseg.

Celobrojna promenljiva  $k$  predstavlja broj kanala i može imati sledeće vrednosti:  $-7, -6, -5, \dots, 0, 1, \dots, 13$ .

Kako se vidi, postoji 21 kanal i 24 satelita, tako da pojedini sateliti moraju koristiti iste kanale. Poseban problem predstavlja preklapanje frekventnih opsega GLONASS sistema i sistema predviđenog za satelitske komunikacije (1610 MHz). Zbog toga se napušta korišćenje kanala sa indeksom većim od 7, tako da se za period posle 2005. godine planira korišćenje kanala sa indeksima od  $-7$  do 6. Osnovni nosilac C/A signala je pseudoslučajni kod (PRN) dužine 511 bita sa periodom ponavljanja od 1 ms. Ovaj pseudoslučajni kod je isti za sve GLONASS satelite. Navigacioni podaci se emituju brzinom od 50 bita u sekundi. Nosilac na L1 opsegu moduliše se zbirom (po modulu 2) sledeća tri binarna signala: – pseudoslučajnog koda brzine 511 bita/s; – navigacione poruke brzine 50 bita/s i – pomoćnog signala frekvencije 100 Hz.

Nosilac na opsegu L2 moduliše se zbirom (po modulu 2) pseudoslučajnog koda i pomoćnog signala.

Osnovni nosilac HP-signala je pseudoslučajni signal učestanosti 5,11 MHz. HP-signali se, takođe, emituju na L1 i na L2 opsegu.

Navigacioni podaci su organizovani u stringove, ramove i superramove. Trajanje stringa je dve sekunde. Prvih 1,7 sekundi čine 85 bita navigacione poruke, a preostale 0,3 sekunde zauzima 30-bitni sinhronizacioni blok koji je isti za sve stringove. Jedan ram se sastoji od 15 stringova. Superram ima pet ramova.

Osim podataka o sopstvenim koordinatama i vremenu svog časovnika, svaki satelit šalje podatke o položajima ostalih satelita. Predaja kompletne poruke superrama traje 2,5 minuta.

### Tačnost sistema GLONASS

Uz korišćenje SP signala, bez drugih dodatnih mera za povećanje tačnosti, GLONASS obezbeđuje sledeću tačnost:

– greška određivanja horizontalnog položaja (u odnosu na elipsoid PZ-90) kreće se od 57 do 70 m sa verovatnoćom od 99,7%;

– greška određivanja vertikalnog položaja (u odnosu na elipsoid PZ-90) iznosi do 70 m sa verovatnoćom od 99,7%;

– razlika između ruskog UTC vremena i GLONASS vremena (izuzimajući tri sata) ne prelazi 1  $\mu$ s sa verovatnoćom od 99,7%.

U SP signal se ne unose namerne greške. Izvori grešaka su iste prirode kao i kod NAVSTAR sistema: DOP (rasipanje preciznosti), promenljiva putanja signala kroz jonosferu i troposferu, greške u koordinatama satelita, refleksija radio-talasa i slično. Mere za povećanje preciznosti su iste kao kod NAVSTAR sistema (diferencijalni GPS i slično).

#### Literatura:

- [1] INTERFACE CONTROL DOCUMENT, fourth release. Coordination Scientific Information Center (KNIC) of the Russian Space Forces, Russia, 117279, Moscow, PO Box 14 (1998) <http://www.rssi.ru/SFCISIC/SFCISIC-main.html>.
- [2] Habrich, H.: GEODETIC APPLICATION OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM (GLONASS) AND OF GLONASS/GPS COMBINATIONS, Dissertation, University of Berne, Switzerland, 1999.
- [3] Borjesson, J.: GLONASS CONTRIBUTION TO SPACE GEODESY, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2000.
- [4] State Frequency and Time Service Official Bulletin (Mendeleevo, Moscow region) <http://www.ru/SFCISIC/SFCISIC-main.html>.

## INFOFEST 2001

– prikaz naučno-stručnog skupa –

U periodu od 23. do 29. septembra 2001. godine u Budvi je održan osmi INFOFEST 2001, smotra dostignuća iz oblasti informatike i telekomunikacija. Organizatori skupa bili su Sekretarijat za razvoj vlade Crne Gore i kompanija za konsalting – Biznis link iz Beograda.

Cilj manifestacije bio je da se prikažu dostignuća i pravci razvoja u oblasti informatičke tehnologije i telekomunikacija, na reprezentativnom uzorku vodećih svetskih i domaćih firmi i odabranih autora, po pozivu i sa javnog konkursa.

Program manifestacije tradicionalno se realizuje kroz više različitih formi: izložbene postavke firmi, prezentacije firmi u konferencijskoj dvorani, izlaganja autorskih radova sa javnog konkursa iz domena informatičkih i telekomunikacionih tehnologija i drugi posebni i prateći sadržaji.

Ove godine organizovan je i međunarodni workshop na temu „Kako do informatičkog društva – inicijativa SEE“ u saradnji sa Evropskom unijom, vezan za programe i projekte iz oblasti digitalizacije društvene organizacije, koji se finansiraju sredstvima Pakta za stabilnost jugoistočne Evrope (eSEE initiative). Na ovoj međunarodnoj tribini učestvovali su brojni inostrani gosti. Među njima su bili ambasador Velike Britanije, kao i ministri obe republičke vlade.

Koncept elektronske državne uprave (e-government) Vlade Srbije u ime Agencije za razvoj informatike i Internet Republike Srbije izložio je ministar za nauku, tehnologiju i razvoj prof. D. Domazet.

U zvaničnom programu predstavljene su domaće informatičke firme Digit Montenegro, Serbian Bussines Systems, Energodata, Internet Crna Gora, Meridian, MFC, Informatika Montenegro, ABS, Planet, ESG, MDS, Čikom, Mikrokrojiga, Saga, Bull Hn Jugoslavija.

Domaće firme predstavile su svoje proizvodne programe i rezultate. Tako je, na primer, firma Digit Montenegro, predstavila projekat računarske mreže i informacionog sistema Luke Bar – a Energoprojekt Energodata informacioni sistem Poštanske štedionice. Ove firme nagrađene su za nastup na ovogodišnjem INFOFEST-u.

Međunarodni karakter festivala ogledao se u učešću najvećih inostranih firmi i gostiju sa svih pet kontinenata, kao i autora nekih radova, pre svega sa prostora prethodne Jugoslavije, iz Slovenije i Hrvatske. Nastup niza slovenačkih firmi objedinjen je pod zajedničkim nazivom „Dani slovenačke informatike“.

Svoja dostignuća predstavile su najveće svetske informatičke kompanije, koje definišu pravce razvoja i standarde u oblasti informatike i telekomunikacija:

Microsoft, Oracle, IBM, SAP, Compaq, Hitachi, CISCO, Ericsson, Siemens, kao i austrijski S&T. One su naglasile značaj elektronskog poslovanja (e-buisiness) i mobilnih komunikacija, odnosno tehnologija za uključivanje sopstvenog informacionog sistema u svetsku računarsku mrežu. Microsoft je potvrdio svoju vodeću ulogu i predstavio novu internet tehnologiju (.net) i novi operativni sistem Windows XP.

Kompanija Oracle izložila je svoju koncepciju elektronskog poslovanja i tehnologiju prilagođavanja postojećih sistema razvijenih na njihovom softveru, koja omogućava uključivanje veoma šarolike hardverske opreme u globalnu mrežu.

Jedan primer organizacije elektronskog poslovanja predstavlja pristup nemačke kompanije SAP, treće svetske softverske firme sa prometom od 6,2 milijardi dolara godišnje. Nekoliko hiljada njihovih projekatata i programera više od dvadeset godina razvija poslovni informacioni sistem, nezavisan od platforme i softvera za upravljanje bazama podataka, koji sublimira iskustvo i potrebe oko 600 najvećih svetskih kompanija (kao što su npr. Coca Cola, Siemens, Sony, Volvo ili Volkswagen). To znanje i iskustvo sistematizovano je u brojna tipska rešenja za određene delatnosti ili privredne grane (npr. diskretna industrija, procesna industrija, avionska i vojna industrija, vojna logistika).

Pre uvođenja, SAP poslovni informacioni sistem se prilagođava različitim specifičnim potrebama korisnika, od jezika za komunikaciju do poreskih propisa i carinskih procedura. Celokupan sistem funkcioniše na Internet mrežnoj osnovi i omogućava različite veze sa informacionim sistemima partnera i korisnika.

SAP poslovni sistemi instalirani su u mnogobrojne veće firme u oko 130 zemalja, a u našoj zemlji ih uvode Sintelon i Tehnogas. Ipak, ovakvi sistemi nisu ispla-

tivi za male firme, već samo za veće kompanije (sa prometom od nekoliko desetina miliona maraka naviše).

U naučno-stručnom delu izložena su 23 prihvaćena rada sa javnog konkursa iz oblasti: projektovanje informacionih sistema, aplikativni domeni informacionih sistema, računarske mreže i telekomunikacije, Internet i elektronsko poslovanje, multimedijalni sistemi, softversko inženjerstvo, specijalizovane informacione tehnologije, računarski hardver, teorijske osnove i trendovi razvoja informacionih sistema, sistemski ambijent, nove informatičke i komunikacione tehnologije i ekspertski sistemi.

Iz Vojske Jugoslavije predstavljena su četiri rada, iz oblasti logistike, veštačke inteligencije i razvoja informacionih sistema (redosled iz kataloga):

– „Koncept integralne logističke podrške kao osnova razvoja i primene informacione tehnologije“ autora pukovnika mr Miodraga Brzakovića iz Centra za informatičku podršku pozadine GŠ VJ i Radoša Popadića iz JP PTT saobraćaja „Srbija“;

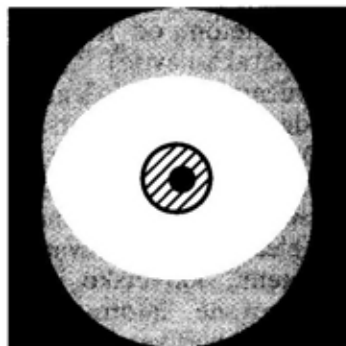
– „Sistem za induktivno učenje pozicionih pravila Empiric.Rules“, autora potpukovnika Vladislava Miškovića iz Centra za informatičku podršku pozadine GŠ VJ, Beograd;

– „Strategija razvoja nacionalnih zdravstvenih informacionih sistema“, autora mr Milovana Obradovića iz Vojnomedicinske akademije, Beograd;

– „Iterativni proces razvoja informacionog sistema“, autora dr Alempija Veljovića iz Vojnotehničke akademije, Beograd i Zorana Eremije, DIZIS Beograd.

Autorska izlaganja izazvala su veliko interesovanje i bila su veoma dobro posećena.

Svi radovi objavljeni su u zvaničnom katalogu festivala. Dodatne informacije o INFOFEST-u 2001, kao i o dosadašnjim skupovima, mogu se naći na Internet adresi [www.infofest.com](http://www.infofest.com).



## prikazi iz inostranih časopisa

### SAVREMENI RAKETNI SISTEMI PVO KRATKOG DOMETA\*

Vojni sukobi u nekoliko proteklih dekada navode na zaključak da će se u avioudarima za vreme borbenih operacija i u 21. veku koristiti precizno vođeno oružje, koje će se navoditi na izvore zračenja borbenih sistema PVO. Za pokrivanje tih napada koristiće se elektronski ometači velike aktivnosti.

Taj faktor naglo smanjuje borbenu efikasnost grupacija PVO koje koriste aktivne radarske uređaje, i daje posebnu važnost raketnim sistemima PVO koji koriste pasivne sisteme. Ti sistemi su sposobni da otkriju ciljeve pri približavanju i da ih prate i unište kada dođu na efikasan vatreni domet.

Kompanije Ruski odbrambeni sistemi, Optroničke tehnologije i Projektni biro Titan izgradile su bazični novi raketni sistem PVO kratkog dometa, opremljen pasivnom optroničkom panoramskom stanicom Feniks koja registruje IC zračenje cilja. Sistem je otklonio nedostatke koje su imali radarski sistemi za otkrivanje cilja, i ima veliku otpornost na elektronsko i druge vrste ometanja.

\* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, juli 2001.

Raketni sistem PVO namenjen je da automatski otkrije, prati, identifikuje i uništi razne zemaljske ciljeve (tenkove i dr. borbena vozila), ciljeve na vodi (brze čamce) i ciljeve u vazдушnom prostoru (subsonične i supersonične avione i rakete, uključujući protivbrodske krstareće rakete, vođene aviobombe, helikoptere, itd.).

Optronička stanica sistema sposobna je da razlikuje dvojne ciljeve po azimutu i elevaciji. Raketni sistem PVO je jedinstveni projektni modul sa zajedničkom osnovom, koja se montira na noseću obrtnu platformu sa električnim pogonom po azimutu, ima dva simetrično postavljena prenosnika sa nosačima za četiri raketne kasete, optroničku stanicu i laserski daljinomer sa pogonom po elevaciji.

Modul sadrži kontrolnu opremu, električni servouređaj velike preciznosti i sekundarni izvor energije.

Kabina operatora opremljena je upravljačkim panelom i kompjuterom. Sistem može da lansira rakete Iгла, kao i druge tipove raketa.

Modul se može ugraditi na točkaše i gusenična terenska vozila (npr. GAZ-39371 Vodnik, Hummer, BTR-80, BMP-2, BMP-3, BMD-3), na ratne brodove raznih tipova, na bušačkim platformama, uzvišenjima, itd.



Sistem obezbeđuje efikasno uništenje ciljeva u zaštićenoj zoni u uslovima radio-tišine, obustave radio-frekvencija ili pri protivlektronskim dejstvima. Čim se cilj otkrije, on se identifikuje kao sopstveni ili protivnički pomoću upitnih signala, koordinate mu se automatski određuju i prati se po azimutu i elevaciji. Kada se glave za samonavođenje rakete poklope sa ciljem, raketa se lansira radi njegovog uništenja.

Novi raketni sistem PVO sa optroničkom stanicom Feniks pripada najnovijim tehnologijama. On će, nema sumnje, postati efikasno sredstvo za zaštitu od precizno vođenih borbenih sredstava pri napadu iz vazdušnog prostora.

M. Krbavac



## **NOVI SISTEM PVO ZA RUSKU MORNARICU\***

Ruska mornarica dobila je novo savremeno oružje, višekanalni raketni sistem PVO Rif-M koji je razvila istraživačka i proizvodna asocijacija Altair i Moskovski projektni biro Fakel.

Sistem je projektovan za izvršavanje zadataka odbrane zone mornaričkih snaga od masovnih aviodarara, krstarećih raketa lansiranih iz vazdušnog prostora, protivbrodskih krstarećih raketa, uključujući i manevrišuće letelice na vrlo malim visinama. Za razliku od višekanalnog raketnog sistema PVO Rif, sistem Rif-M može istovremeno da uništi do 6 ciljeva na maksimalnoj udaljenosti do 120 km, kao i protivbrodske rakete na visinama od 10 m.

Širenje sistemskog odbrambenog ubojnog bedema ostvareno je povećava-

njem snage odašiljača i osetljivosti prijemnih kanala.

Sistem Rif-M može se koristiti u sledećim uslovima:

- na otvorenom moru;
- uz uzdužno ljuljanje broda od  $\pm 15^\circ$  sa periodom od 8 do 10 s;
- uz poprečno ljuljanje od  $\pm 3^\circ$  sa periodom od 5 s;
- uz vibracije frekvencija 0 do 20 Hz i amplituda  $\pm 0,5$  mm.

Sistem sadrži podsistem za upravljanje brodom, lanser, jedinice PVO i opremu smeštenu na kopnu.

Sistem za upravljanje sačinjen je od savremenih elektronskih komponenata. Njegov softver ima svojstvo veštačke inteligencije i omogućava značajno pojednostavljenje i ubrzanje rada operatora u borbenom režimu, i smanjenje vremena za provere i dijagnostiku. U sistem je ugrađena oprema za snimanje postupaka gađanja, zapis izveštaja i brzu analizu rezultata dejstva, kao i proveru operativnog stanja sistema. Njegovo antensko mesto (FAR sa elektronskim skeniranjem signala) sklopivo je. Nova elektronska kola i algoritmi štite sistem od aktivnih šumova, čime se obezbeđuje velika otpornost na ometanje.

Vertikalno lansirajuće rakete Rif-M 48N6E imaju poboljšani motor i veću eksplozivno-fragmentacionu bojnu glavu. Vođene rakete opremljene su poluaktivnim glavama za granično navođenje, a isporučuju se u transportno-lansirnim kontejnerima.

Rakete se lansiraju iz lansirnih cevi montiranih na palubi. Svaki lanser je popunjen sa 8 raketa u transportno-lansirnim kontejnerima. U brodskim uslovima nije potrebno nikakvo servisiranje raketa.

Brodovi naoružani sistemom Rif-M pomažu organizovanje kolektivne PVO

\* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, mart 2001.

pomorskih snaga, uz znatno proširenje zone šticebnog vazdušnog prostora.

Koristeći jedan ili dva sistema Rif-M, pomorske snage mogu efikasno da se suprotstave neprijateljevim udarnim sredstvima i ometačima kao i sistemu C<sup>3</sup>I.

M. Krbavac



## NOVI ARMIJSKI PIŠTOLJ PYa\*

Kasnih osamdesetih godina ruska armija postavila je zahteve da pištolji imaju veću efikasnost, da koriste snažniju municiju i imaju veći kapacitet okvira. Povećana efikasnost je zahtevana zbog toga što je zaštitni pancirni prsluk postao sastavni deo opreme svakog pešadinca. Osim toga, u to vreme najveći broj armija imao je u svom inventaru tzv. „čudesne devetke“, pištolje prilagođene za municiju 9 mm Luger sa povećanim kapacitetom okvira za 15 ili više metaka. Pištolj sa 9 metaka prilagođen za municiju 9 mm pokazao je nedostatke, jer je njegova energija na ustima cevi bila svega 300 J, a specifična energija (indeks probojnosti) oko 45 J/mm<sup>2</sup>.

Objavljen je konkurs za razvoj novog armijskog pištolja nazvanog Grač. U početku su konstruktori razmatrali modularni pristup konstrukciji, jer je armija raspolagala ogromnim zalihama pištoljske municije 7,62 mm. Ideja je bila da se koriste zamenljiva cev i sklop okvira, municija 9 mm za pištolje Makarov, modernizovana municija 9 mm, municija 9 mm za Parabelum i municija 7,62 mm za pištolj.

Započeti su radovi na tri verzije:

– Grač-1 koji radi na principu trzanja i korišćenja gasne kočnice, kao kod pištolja Heckler & Koch M7;

– Grač-2 radi na principu kratkog trzanja i koristi kretanje cevi za zabavljanje;

– Grač-3 koji je verzija pištolja Makarov podešenog za municiju 9 mm pojačanog udara.

Pored modela Grač, do finalne, treće etape testiranja dospelo je i pištolj koji je razvio Centralni istraživački institut precizne mašinske tehnike. Za vreme testiranja pištolji su bili podvrgnuti testovima na izdržljivost i ispravno funkcionisanje u normalnim i otežanim uslovima, na grupisanje pogodaka i efikasnost vatre. Pri uvežbavanju pripadnika federalne službe bezbednosti na kursu vatrene obuke, ovim pištoljem, njih 65% postiglo je odlične i dobre rezultate. Pištolj Iževskog zavoda ispunio je većinu strogih armijskih zadataka i bio je preporučen za upotrebu. Postao je operativan pod oznakom pištolj 9 mm Jarjugin (PYa).

Konstruktori pištolja učinili su sve da stvore veoma pouzdano oružje, iako je najveći deo tehničkih rešenja tradicionalan. Dejstvo je bilo zasnovano na principu kratkog trzanja, dok se zabavljanje postiže pri kretanju cevi međusobnim dejstvom zuba na donjem osloncu prstena cevi, zatvarača i otvora izbacača. Okvir pištolja je od čelika. Plastična drška pištolja je oblika slova U sa poprečnim ozubljenjem na zadnjoj površini i uzdužnim ozubljenjem na bočnim površinama. Mehanizam za opaljenje je udarnog tipa s glavnom oprugom i obezbeđuje dvostruko dejstvo. Poluga osigurača je smeštena na obe strane okvira. Njime se blokira udarni mehanizam u napetom ili otpuštenom položaju. U osiguranom položaju on čvrsto međusobno vezuje zapijnjak, okidač, udarač i zatvarač. Moguć-

\* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, maj 2001.

nost blokiranja udarnog mehanizma u napetom položaju omogućava opaljenje posle deaktiviranja sigurnosnog položaja u kratkom hodu i laganim povlačenjem obarače, što povećava verovatnoću pogotka prvim hicem. Izbacrač praznih čaura koji prilično izlazi iznad površina zatvarača kada je municija napunjena, služi i kao indikator stanja napunjenosti pištolja.

Municija se ubacuje iz dvorednog okvira sa 17 metaka, koji se blokira pomoću polužice smeštene na levoj strani okvira ispod desnog palca. Ako je potrebno ova polužica može da se montira i na desnu stranu okvira.

Pištolj ima cev dugu 112,5 mm, a njegove ukupne dimenzije su 196 × 140 × 38 mm. Masa praznog pištolja iznosi 0,95 kg.

Pored ovog, razvijen je i pištolj MR-446 Viking koji se zasniva na pištolju Grač i koristi municiju 9 × 19 mm Luger. Viking ima plastični okvir zbog čega je lakši u odnosu na PYa za 100 grama.

M. Krbavac

<<<◇>>>

## ŠKORPION – NOVA VERZIJA Su-25\*

Škorpion je oznaka za modernizovani avion Suhoj Su-25K (NATO oznaka Frogfoot-A), koji su zajednički razvili izraelski Elbit Systems i gruzijska fabrika Tbilisi Aerospace Manufacturing (TAM). Škorpion je prvi put oficijelno poletio aprila 2001. godine sa fabričkog aerodroma u Tbilisiju.

Projekat kojim je Su-25 dobio sasvim nove borbene mogućnosti, zahvaljujući modernom napadno-navigacijskom sistemu i „staklenom“ kokpitu, započet je septembra 2000. godine.

\* Prema podacima sa [www.janes.com](http://www.janes.com)



Škorpion – nova verzija Su-25

Nadogradnja elektronske opreme zasnovana je na dvostrukoj magistrali podataka 1553B i Elbitovom modularnom višenamenskom kompjuteru. Originalni kokpit opremljen, uglavnom, analognim instrumentima redizajniran je sa dva višenamenska kolor displeja, 6 × 8 inča, novim head-up displejom (HUD), novim upozoravajućim panelom i komandama HOTAS (ruke na palici i gasu).

Novi GPS/inercijalni navigacijski sistem, zajedno sa Elbitovom pokretnom mapom, VOR/ILS, DME čine napadno-navigacijski sistem. Dve nove radio-stanice, jedna VHF i jedna UHF, sa sigurnosnim modovima, takođe su instalirani.

Postoji mogućnost opremanja i kaciom sa integrisanim nišanom na viziru, kao i navigacijskim sistemom TACAN. Postojeći ruski radio-visinomer i laserski daljinomer – obeleživač tipa KLEN su zadržani.

Premda je ovaj program još uvek demonstrativnog karaktera, pretpostavlja se da će gruzijski proizvođač pokušati da dobije posao modernizacije velikog broja aviona ovog tipa širom sveta. Na ruku im ide i to što su jedini proizvođači jednosede verzije Su-25. Sa takvim ciljem čitav program je i predstavljen na ovogodišnjem pariskom avio-salonu.

S. Vlačić

<<<◇>>>

## OD NAORUŽANOG HELIKOPTERA DO DALJINSKI UPRAVLJANIH LETELICA\*

Eksperimentalni projektni biro Kamov, već preko pola veka razvija svetski poznate helokoptere. Oni su na upotrebi u preko 25 zemalja, a postavili su i 24 svetska rekorda. Najpoznatije Kamove mašine su brodski helikopter Ka-28, izviđački helikopter Ka-31 i borbeni helikopter Ka-50 Crna ajkula.

Helikopter Ka-50 opremljen je istraživačko-pretražnim i upravljačkim sistemima, i snažnim oružjem velike preciznosti, a ima mogućnosti da uništava zemaljske ciljeve i ciljeve u vazдушnom prostoru danju i noću. To je borbeni helikopter sa velikom sposobnošću preživljavanja, sposoban da izvršava zadatke pod intenzivnom protivničkom PA vatrom. Visok nivo letnih performansi i tehničkih karakteristika omogućavaju mu da leti i da se bori u uslovima visokih temperatura i na planinskom zemljištu. Ka-50 je savremeni oružni sistem velike tačnosti sa velikim mogućnostima modernizacije. Njegov osnovni projekat korišćen je za razvoj i izgradnju helikoptera Ka-52 Aligator.

To je višefunkcionalni helikopter, koji se nalazi u fazi ispitivanja. Namenjen je za izvršavanje dnevno-noćnih zadataka zemaljske podrške, i moći će da uništava pokretne ciljeve na rastojanjima do 8000 m sa verovatnoćom pogađanja bliskoj 1, bez ulaženja u zonu protivničke PVO. Helikopter Aligator može da koristi sve pripadajuće naoružanje helikoptera Ka-50 Crna ajkula, kao i nove generacije naoružanja. Ka-52 može se koristiti kao komandno mesto armijske avijacije, i za znatno povećanje efikasnosti grupnih dej-

stava jurišnih helikoptera. Može se, takođe, koristiti kao borbeni trener. Njegova dva pilota smeštena su paralelno na katapultirajućim sedištim. Svaki od njih može aktivirati svo raspoloživo naoružanje.

Za otkrivanje brodova, niskoletućih aviona i krstarećih raketa na velikim rastojanjima Kamov je razvio izviđački helikopter Ka-31. Njegov serijski proizvedeni prototip imao je promotivni let maja meseca 2001. godine. Komplet njegove avionike obezbeđuje radarsko otkrivanje cilja, prikupljanje i prenos informacija o situaciji na zemlji, moru i u vazдушnom prostoru do komandnih mesta na zemlji ili brodu. Ključna komponenta opreme avionike je moćni kružni radar. Helikopter može znatno da doprinese efikasnosti borbenih operacija mornarice, armijske avijacije i oklopnih jedinica. Njime se umanjuju protivničke glavne prednosti, kao što su mogućnost prikrivenog manevra i iznenadni napadi.

Prva serija helikoptera Ka-31 gradi se po ugovoru za Indiju.

Za armijsku avijaciju Kamov je razvio višenamenski helikopter velike brzine Ka-60 Kasatka, nosivosti 6500 kg, koji se nalazi u fazi probnih letova. Polimer kompozitni materijali, koji čine oko 60% konstrukcije, povećavaju otpornost na oštećenja zadobijena u borbi. Helikopterom će se prevoziti 12 potpuno opremljenih vojnika, naoružanje i oprema za borbene zadatke na terenu i evakuacija ranjenih. Njime se mogu izvršavati i patrolni ili istraživačko-spasilački zadaci. Kasatka će značajno obnoviti trenaznu flotu u školama za pilote.

Helikopter Ka-60 pokreće turbo motor modularne konstrukcije RD-600V, koji je razvila i izgradila Rjabinska motorna industrija.

\* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, juli 2001.

Aerodinamička perfekcija njegove konstrukcije i sistem podizanja, kombinovani sa malom specifičnom potrošnjom goriva, obezbeđuju Kasatki svetski standard po efikasnosti i korisnoj nosivosti.

Kamov je razvio nove helikoptere u saradnji sa institutima i preduzećima Moskovske regije, kao što su Žukovski, Ramenskoje, Krasnogorsk, Stupino i dr. Centralni aerodinamički institut, Letno istraživački institut, Centralni institut aviomotora, firme za razvoj avionike, instrumenata i kompozitnih materijala, kao i zavodi za mašinogradnju, takođe su aktivno učestvovali u implementaciji Kamovih projekata.

Kamov sada preduzima nove korake u domaćoj helikopterskoj industriji, i započinje razvoj bespilotnih helikoptera, za koje se očekuje da će imati značajnu ulogu u 21. veku. Kamov testira prototip bespilotnog helikoptera Ka-37, koji će služiti kao osnovni projekat za više verzija namenjenih da zadovolje potrebe odbrane, policije i civilne namene.

M. Krbavac

<<<◇>>>

## NAJDUŽI LET BESPILOTNE LETELICE RQ-4A\*

Sletanjem u vazduhoplovnu bazu Edinburg u južnoj Australiji, aprila 2001. godine, bespilotna letelica RQ-4A Global Hawk uspešno je završila svoj najduži let.

Leteći iz baze Edwards u Kaliforniji, Global Hawk je preleteo oko 12000 km za 22 časa, koliko je let trajao. Za vreme šestonedeljnih ispitivanja u Australiji, letelica Global Hawk bila je označena kao Southern Cross II.

Prelet letelice deo je zajedničkog američko-australijskog programa u kojem

\* Prema podacima sa [www.janes.com](http://www.janes.com)



Bespilotna letelica RQ-4A

treba da se ispita efikasnost Global Hawka u izvođenju izviđačkih misija iznad ogromnih morskih prostranstava, na velikim udaljenostima od obale. Sposobnost da se tehnologijama primenjenim na RQ-4A ostvari efikasno otkrivanje objekata u širokom vodenom pojasu australijske ekonomske zone, izazvalo je interesovanje australijskih odbrambenih snaga, obalske straže i carine.

Southern Cross II je peti razvojni vazduhoplov iz programa Global Hawk i treba da izvede 12 letova iznad australijske teritorije.

Standardni asortiman opreme i raznih senzora letelice Global Hawk namenjen je, prvenstveno, za izvođenje zadataka izviđanja i osmatranja iznad kopna. Southern Cross II će, pored standardnog paketa, imati i dodatne senzore za izvođenje zadataka iznad morskih površina. Ti senzori su razvijeni u saradnji sa australijskim agencijama koje se bave naukom i tehnologijom.

Australijske odbrambene snage će, takođe, ispitati stepen u kojem je moguće integrisati mogućnosti RQ-4A sa ostalim sredstvima kojima raspolažu australijske odbrambene snage. U pitanju je radarska mreža Jindalee za osmatranje preko horizonta i četiri AWACSA Boeing B-737, koji uskoro treba da budu isporučeni.

S. Vlačić

<<<◇>>>

## OPTIČKE TEHNOLOGIJE U BUDUĆNOSTI\*

Naučni i tehnički progres na razmeđu dva veka karakteriše se dosad najširoim upotrebom najnovijih dostignuća u nauci i tehnologiji. Među njima je i optička tehnologija.

Uloga optičkih sistema u raznim industrijama sve više raste, uključujući i mašinska postrojenja gde se 80% svih merenja obavlja u optičkoj tehnici, kao i informacionoj i kompjuterskoj tehnici. Optički prikazi najefikasniji su put čuvanja podataka, prenosa i konverzije.

Holografi mogu radikalno povećati kapacitet kompjutera za razvoj svih sistema i brzih kompjutera nove generacije, zasnovanih na integrisanim tehničkim krugovima, memorijskim hologramima i principima nelinearnih i tranzitnih optika.

Razvoj neuronskih kola za obradu slike na bazi holografskih korelatora i metoda digitalnih ikona, koristeći arhitekturu neuronskih procesa, najznačajnije je područje u razvoju optičke informacione tehnologije.

Budući optički sistemi uveliko će zavisiti od razvoja lasera. Progres na tom polju omogućava prenos energije na velika rastojanja, proučavanje strukture materije u jakim poljima, razvoj sistema za upravljanje oružjem velike preciznosti, upravljanje kretanjem kosmičkih brodova, veoma tačne informacione sisteme, monitoring okoline i sisteme za efikasno protivdejstvo od optroničkih i toplotnih sistema protivnika.

Laseri menjaju strukturu materije, koriste se u hirurgiji, za sečenje, spajanje, istiskivanje i topljenje raznih materijala,

sa velikom preciznošću i obavljaju mnoge druge tehnološke operacije.

U nuklearnim pogonima laseri služe za odvajanje izotopa i vođenje mnogih nuklearnih procesa fuzije. Kombinovanje lakih provodnika i mikrolasera unelo je revoluciju u komunikacije, a mnogostruko je povećan kapacitet poverljivih veza. Veliki progres je učinjen u razvoju kanala otvorenih laserskih komunikacija, uključujući one koje se koriste u kosmosu.

Mikroelektronska tehnologija bila je prvobitno zasnovana na optičkoj litografiji. Danas istraživači, koristeći lasersku i ultrapreciznu optičku opremu, pokušavaju dostići submikronsku rezoluciju za proizvodnju čipova sa vrlo visokim nivoom integracije.

Optički uređaji i metode masovno se koriste u nacionalnim ekonomijama, jer su neophodni u metalurgiji, mašinogradnji, hemijskoj industriji, agronomiji i prehrambenoj industriji. Koriste se za izradu neposrednih i strukturnih analiza metala i legura, za precizna merenja i određivanje sastava i čistoće tečnosti, čvrstih i gasovitih supstanci.

Optičke metode koriste se i za medicinske i biološke analize, dijagnoze i lečenje teških bolesti, u kliničkim studijama, dijagnozi i lečenju bolesti očiju, u mikro i neurohirurgiji, otolaringologiji i drugim oblastima.

Spektrofotometrička oprema je vrlo efikasna u obezbeđenju zaštite okoline. Koristi se za određivanje elementarnog sastava prirodnih i otpadnih voda i detekciju toksičnih nuklearnih nečistoća u vodi i površinskim slojevima.

Optički uređaji i sistemi pomažu smanju okoline u normalnim i vanrednim situacijama prouzrokovanim prirodnim ili ljudskim katastrofama.

\* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, maj 2001.

Dostignuća u optičkim materijalima pomažu proizvodnju novih vrsta đubriva koja sadrže sve potrebne komponente za uzgoj visokoproizvodnih i ekološki čistih kultura.

Uloga optičkih tehnologija u razvoju novih tipova naoružanja i vojne opreme konstantno raste. Tehnologija izrade i primene optičke i optroničke opreme spada u glavne odbrambene tehnologije. Optroničke tehnologije imaju odlučujuću ulogu u razvoju novih sredstava ratne tehnike, kao što su precizno vođeno oružje, sistemi za PED i robotizovani sistemi oružja, lasersko oružje i simulatori.

Optronička oprema ima specijalno mesto u prikupljanju, obradi i čuvanju informacija. Optički i optronički uređaji i sistemi koriste se za izvršenje mnogih zadataka, kao što su satelitsko i druga izviđanja, procena situacije, otkrivanje cilja, praćenje, pozicioniranje i osvetljavanje, nišanje, samonavođenje raketnih i artiljerijskih projektila, razmena komunikacijskih i informatičkih podataka, itd.

Ruska Agencija za konvencionalno naoružanje obuhvata preko 80% nacionalnog razvoja i proizvodnje optomehaničkih i optroničkih instrumenata i sistema, kako civilnih tako i vojnih. Agencija ima 17 industrijskih preduzeća i 25 istraživačkih organizacija, od kojih tri imaju status Državnog istraživačkog centra Ruske Federacije, a druga tri status Federalnog istraživačkog i proizvodnog centra. Sva preduzeća optičke industrije imaju sopstvene projektne biroe i koriste savremena dostignuća nauke i tehnologije uz široku upotrebu kompjuterskih projektnih sistema. Jedinствeni opitni uređaji koriste se za optimizaciju i sertifikaciju složenih optroničkih sistema i instrumenata u konkretnim realnim uslovima.

Svi ti faktori, kombinovani sa tradicionalnim tehnološkim disciplinama odbrambene industrije, garantuju visok kvalitet i pouzdanost optroničkih sistema i instrumenata. Industrijske zemlje (SAD, Velika Britanija, Japan i Francuska) koje određuju naučni i tehnološki progres u optičkoj tehnologiji i instrumentima, uključujući i vojne, imaju raznovrsnu i veoma razvijenu tehničku infrastrukturu koja pokriva sve relevantne oblasti fundamentalnih istraživanja optike i optičkih materijala, kao i razvoj novih optroničkih komponenata i sistema raznih namena. U svim tim zemljama te delatnosti imaju široku podršku države. Samo u SAD, na primer, za optiku i optičku tehnologiju godišnje se izdvaja 5% od svih godišnjih izdataka za nauku. Iako u Rusiji to iznosi manje od 0,1%, ona razvija i proizvodi sve vrste optičke opreme u okviru ukupnog tehnološkog ciklusa. Ekspertske procene govore da je po tome u samom vrhu, a u nekim oblastima optroničke i laserske opreme i vodeća u svetu.

M. Krbavac



## **VISOKA ZAŠTITA NIJE BARIJERA ZA KOMFOR\***

U borbeno motorno vozilo T-98 Kombat koje je razvio ruski projektни biro Parfenov ugrađene su specifična karoserija i savremena tehnička rešenja. Vozilo se može koristiti za specijalne zadatke ukoliko se opremi specijalnim respektivnim naoružanjem.

Karakteristike kao što su: zaštita, brzina (max. brzina je 180 km/h), ubrzanje, komfor i mogućnost nošenja oružja čine ovo vozilo pouzdanim i prestižnim.

\* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, mart 2001.

Vozilo se izrađuje u dve verzije: limuzina sa 5 sedišta i karavan sa 9 sedišta.

Karoserija Kombata obložena je visokolegiranim čelikom. Konfiguracija bez rama obezbeđuje maksimalnu čvrstoću karoserije i vozila u celini. Karoserija je opremljena neprobojnim staklima.

Kombat je vozilo konfiguracije 4 × 4 sa pogonom na sve točkove, pri čemu se prednji pogon može isključiti. Napred je postavljen motor Vortes 5.31 V8 snage 186 kW, Vortes 6.01 sa 224 kW, ili 6,51 turbo dizel V8 sa 140 kW. Ovi motori koriste se za armijska motorna vozila Hammer.

Šasija Kombata izrađena je od sklopova i delova koje proizvodi firma General Motors, kao što su prednje i zadnje ovešenje, sklopovi za upravljanje i motor sa transmisijom. Transmisija je četverostepena elektronski upravljana automatska jedinica. Ovešenje je nezavisno sa poprečnim stabilizatorom. Prednje ovešenje koristi torzione poluge, dok se za zadnje koriste lisnate opruge.

Kombat je projektovan u sledećim verzijama:

- PRO (protected – zaštićena), kod koje oprema štiti od svih tipova lakog naoružanja (TT i pištolji Makarov, automati Uzi). Vozilo poseduje opremu velike čvrstoće otpornu na mehanička oštećenja;

- visoko zaštićena, kod koje ugrađena oprema štiti od automatskih pušaka Kalašnjikov (zrna sa termički ojačanim jezgrom), snajperskih pušaka SVD (zrna sa čeličnim jezgrom) i pušaka G3 (NATO);

- supervisoko zaštićena, kod koje osnovni paket zaštite obezbeđuje zaštitu od snajperskih pušaka SVD sa pancirnim zrnima. Dodatna zaštita uključuje povećanu zaštitu uzduž karoserije po zonama maksimalne verovatnoće pogađanja zrna, smanjenje površina pod staklom debljine i do 100 mm i kombinovana keramičko-metalna zaštita sa povećanim otporom unutrašnjeg sloja karoserije na kumulativni mlaz stvoren, na primer, projektilima bacača granata RPG-7.

Kombat poseduje dodatnu opremu:

- široki poklopac ugrađen na krovu koji se koristi za evakuaciju putnika i ugrađene specijalne opreme;

- sistem za regulisanje pritiska u kabini, kao i aktivni ventilacioni sistem za zaštitu od toksičkih gasova;

- puškarnice namenjene za otvaranje vatre iz automatskog oružja, koje su opremljene sistemom za izbacivanje barutnih gasova, a mogu se opremiti i električnim komandama za otvaranje i zatvaranje;

- sigurnosni jastuk (jedan ili dva);

- uređaj za kondicioniranje vazduha;

- električno zagrevanje sedišta;

- grejač za startovanje motora i programirani ili daljinski upravljač za zagrevanje kabine;

- čekrk ugrađen na prednjem ili zadnjem braniku.

Kombat se za sada isporučuje samo po narudžbi, a vreme će pokazati da li će ići i u maloserijsku proizvodnju.

M. Krbavac







## tehničke novosti i zanimljivosti

### USPEŠNE PROBE RAKETA TRIDENT II D5\*

Tri balističke rakete mornaričke flote SAD Trident II D5, koje je izgradila firma Lockheed Martin Missiles & Space, uspešno su lansirane u probnim ispitivanjima sprovedenim na poligonima istočne obale Floride.

Testovi su deo kontinuiranih serija operativnih razvojnih testova koje izvodi Mornarica SAD radi uvida u sigurnost, pouzdanost, gotovost i mogućnosti rakete Trident II D5, kao strategijskog sistema oružja.

Raketa Trident II D5 je trostepena, s pogonom na čvrsto gorivo, inercijalno vođena, a lansira se sa podmornica. Dužina je 13,5 m (44,5 ft), prečnik joj je 2,11 m (83 inča), ima domet veći od 4000 nautičkih milja i nosi do 8 nezavisnih kosmičkih sredstava za višekratnu upotrebu.

Trident II D5, šesta generacija balističkih raketa američke flote, koje je razvila firma Lockheed Martin za Mornaricu SAD, sada je locirana na Atlantskom okeanu. Mornarica planira da razmesti raketne sisteme D5 u narednih nekoliko

godina i za Pacifičku flotu, a izabrala je firmu Lockheed Martin Missiles & Space kao glavnog ugovarača još 1955. godine. Od tada su za balističku raketnu flotu proizvedene rakete Polaris (A1, A2, A3), Poseidon (C3), Trident I (C4) i Trident II (D5).

Mornarica SAD je od početka proizvodnje do sada nabavila 384 rakete Trident II D5.

M. K.



### NOVA IZRAELSKA RAKETA VAZDUH-VAZDUH\*

Dugi niz godina pretpostavljalo se da Izrael radi na projektu nove aktivno vođene rakete vazduh-vazduh, a program je nedavno i javno obznanjen.

Maja ove godine firma Rafael objavila je postojanje nove rakete nazvane Derbi (Derby) dometa 60 kilometara, koja sadrži aktivnu samonavodeću glavu velike otpornosti na protivелеktronska dejstva.

Raketa može da bude zabravljena i lansirana u kratkodometnom modu (zabavljanje pre lansiranja) i srednjedo-

\* Prema podacima iz časopisa Defence Systems Daily, 27. jun 2001.

\* Prema podacima iz časopisa Air Forces Monthly, July 2001.

metnom modu (zabavljanje nakon lansiranja). Nova raketa ima masu 118 kg naspram američkog konkurenta rakete AMRAAM čija je masa 157 kg, i koristi isti lanser – podvesni nosač kao i starija izraelska raketa Piton 4.

S. V.



## NORVEŠKA PROTIVBRODSKA RAKETA NSM\*

Poznati norveški proizvođač protivbrodskih raketa KDA (Kongsberg Defence & Aerospace AS) počeo je da razvija novu generaciju vođenih protivbrodskih raketa NSM, čija se serijska proizvodnja očekuje 2004. godine. Raketa će moći da se lansira sa kopna (sa vozila), sa mora (patrolni i raketni čamci, fregate) i iz vazdušnog prostora (helikopter, avion). Osnovna verzija rakete NSM imaće turboreaktivni pogon i omogućavaće domet do 160 km (kopnena i brodska verzija), odnosno 250 km (helikopterska verzija).

Glavni podsistemi rakete NSM jesu: tragač cilja, sistem za navigaciju i vođenje rakete, bojna glava, turboreaktivni motor sa rezervoarom za gorivo i startni motor na čvrsto gorivo.

Najvažniji deo sistema za vođenje rakete je veoma efikasan računar koji, pre svega, obrađuje podatke primljene od tragača cilja. Visoka preciznost rakete postiže se zahvaljujući navigacionom sistemu koji se zasniva na inercijalnom sistemu u koji je uključen i GPS kao dopunski sistem. Preciznost leta obezbeđuje laserski visinomer.

Bojna glava, ekvivalenta 100 kg TNT, konstruisana je prema najnovijoj

\* Prema prospektom materijalu KDA.



Vodena protivbrodska raketa NSM (helikopterska varijanta)

tehnologiji. IC tragač širokog vidnog polja ne samo što može da pronađe cilj u svim meteorološkim uslovima, danju i noću, već „ume“ i da izabere onu tačku na cilju čijim pogadanjem će biti ostvaren najveći efekat.

Najznačajnija karakteristika rakete NSM, mase oko 400 kg, jeste njena sposobnost „neprimetnog“ dolaska do cilja zahvaljujući smanjenom IC i radarskom odrazu rakete i kretanju na veoma maloj visini iznad površine mora.

S. A.



## TOP ZA BORBENA VOZILA BEZ POSADE\*

Firma Metal Storm završila je sa vladom SAD ugovorene studije o potencijalnoj primeni potpuno elektronicizovanih balističkih tehnologija. U sklopu studije ispitivana je upotreba tehnologije na elektronski upravljanim topovskim platformama za taktička mobilna robotizovana vozila (TMRV) i borbena vozila bez posada UCAV (Unmanned Combat Aerial Vehicles). Ova studija predstavlja jedno od brojnih proširenja u realizaciji projekta vrednog 17 miliona dolara, koji je Agencija DARPA (Defense Advanced

\* Prema podacima iz časopisa Defence Systems Daily, 28. jun 2001.

Research Projects Agency) marta 2000. godine dodelila firmi Metal Storm za razvoj prototipa usavršene snajperske puške za odbrambene snage SAD.

Izveštaj o studiji podnet je Agenciji DARPA za projekat usavršene snajperske puške. Prema ovoj studiji predviđa se da borbena vozila naoružana topom Metal Storm mogu obezbediti aktivnu zaštitu izviđačkom avionu kakav je JSTARS (Joint Surveillance Target Attack Radar System) ili drugim sredstvima velike vrednosti.

Sisteme JSTARS nose izviđački avioni velikog dometa, namenjeni da lociraju, klasifikuju i prate zemaljske ciljeve u svim vremenskim uslovima, danju i noću. Sistemi JSTARS daju savezničkim komandama informacije potrebne za donošenje efikasnih odluka pri procenama situacije u realnom vremenu.

Studija istražuje i mogućnost potencijalne ugradnje tehnologije Metal Storm i na kopnena robotizovana vozila. Prema jednoj varijanti, robotizovano vozilo opremljeno sistemom Metal Storm treba da ispaljuje gust snop kinetičkih projektila ili eksplozivnih granata, koji prodiru kroz blok ili betonski zid. Prednost robotizovanih vozila je u tome što ona mogu da se šalju na čelu jedinica radi stvaranja prolaza, uz minimalnu opasnost za vojnika.

U narednim mesecima treba da se realizuju operativni prototipovi.

M. K.



## IZRAELSKA JURIŠNA PUŠKA TAR21

Nova izraelska jurišna puška TAR21 (proizvođač IMI) pripada familiji pušaka u konfiguraciji „bull-pup“ (Austrija-

AUG, Velika Britanija – L85A1, Francuska – Famas 53, Kina – Type 97, JAR–CR21). Njene prednosti jesu: mala masa (prazna 2,5 kg), velika preciznost gađanja, povećana efikasnost kao posledica mogućnosti upotrebe različitog dodatnog pribora, jednostavnost rukovanja i lakoća obuke i održavanja.

Puška je izrađena od aluminijuma i plastike, a koristi municiju 5,56 × 45 mm SS109 sa teškim zrnom ili .223 Remington. Proizvodi se u tri verzije sa različitim dužinom cevi.

Dužina osnovne verzije TAR/STAR iznosi 720 mm (cev 460 mm), dok je početna brzina standardne municije 890 m/s. Oznaka STAR označava snajpersku verziju koju proizvođač nudi i kao laki puškomitraljez.

Druga verzija C–TAR21 ima cev dužine 380 mm, a namenjena je za opremanje pripadnika jedinica komandosa. Najmanji model M–TAR21 ima cev dužine 250 mm (dužina puške je samo 480 mm). Usled skraćanja cevi smanjena je i početna brzina metka na 770 m/s.

Cev puške smeštena je u uložak od aluminijuma u prednjem delu sanduka. Ima šest žlebova koji se uvijaju u desnu stranu. Zatvarač je obrtni i u cev se zabavljuje pomoću tri bradavice. Mehanizam za okidanje je robustan i omogućava tri vrste paljbe: pojedinačnu, poluautomatsku i automatsku (rafalnu). U



*Izraelska jurišna puška TAR 21*

rafalnoj paljbi ispaljuje 750 do 900 metaka u minuti.

Za nišanje koristi snajperski durbin ili kolimatorski nišan sa crvenom tačkom (MEPOR, MARS ili TRIFLEX). Kolimatori su aktivnog tipa i za njihov rad je potreban izvor električne energije (baterijski uložak).

Od dodatnog pribora puška TAR 21 ima nožice, prigušivač pucnja, potcevni bacač granata M203, modularni zatvarač za levoruke strelce i uređaje za osmatranje koji pripadaju trećoj generaciji. Spoljašnji presek cevi od 22 mm omogućava upotrebu većine tromblonskih mina zapadnih proizvođača.

S. A.

<<<◇>>>

## MITRALJEZ MK-19 ZA PROJEKILE 40 mm\*

Firma General Dynamics Armament Systems sklopila je ugovor sa armijom SAD na 12,5 miliona dolara za proizvodnju 832 mitraljeza za projekte 40 mm.

Trogodišnji ugovor sadrži opcije za dodatnih 2 496 mitraljeza ukupne vrednosti do 49 miliona dolara. Mitraljezi MK-19 će se proizvoditi u fabrici General Dynamics, Saco, Maine.

General Dynamics proizveo je od 1986. godine više od 25 000 sistema MK-19. Upotrebom visokoeksplozivnih projektila dvojne namene M430, sistemi MK-19 znatno povećavaju vatrenu moć pešadije.

Američka vojska i General Dynamics Armament Systema zajednički proizvode projekte MK430 za MK-19 u

\* Prema podacima iz časopisa Defence Systems Daily, 29. jun 2001.

vojnomo zavodu za proizvodnju municije u gradu Milan u državi Tenesi.

M. K.

<<<◇>>>

## PRVA VERTIKALNA PRIZEMLJENJA LOVCA JSF X-32B\*

Boingov jurišni lovac X-32B, kratkog uzleta i vertikalnog prizemljenja – STOVL (short-takeoff-and-vertical-landing) izvršio je svoje prvo vertikalno prizemljenje, prelazeći pri tome sa konvencionalnog ka letu STOVL. Boing je time ispunio zahtev za program vertikalnog prizemljenja jurišnih lovaca.

Do sada je završeno više od 70% probnih letova koji su započeti marta meseca. Posle klasičnog uzletanja probni pilot je prebacio pogon motora sa krstarećeg režima na režim podizanja, i zatim smanjio brzinu lebdjenja na visinu od 46 m (150 feet) iznad zemlje. Kada se stabilizovao u lebdjenju pilot je spustio avion na 15 m (50 feet) i, manevrišući, vertikalno se prizemljio. Posle toga avion se ponovo popunio i posle klasičnog uzletanja prešao na lebdjenje i vertikalno se spustio na lebdeću platformu. Prelazak ka letu STOVL bio je blag, let kvalitetan, a performanse lebdjenja i vertikalnog prizemljenja potvrdile su očekivanja.

Ovim ispitivanjima demonstrirana je jednostavnost, pouzdanost i mali rizik sistema STOVL, uključujući sposobnost lakog prelaska na i sa let STOVL.

M. K.

\* Prema podacima iz časopisa Defence Systems Daily, 28. jun 2001.

<<<◇>>>

## HELIKOPTERI AH-64 APAČ PRIZEMLJENI RADI PROVERE\*

Američka armija morala je da prizemlji svih svojih 728 helikoptera Apač radi ispitivanja repnih rotora, posle slučaja otkaza u toku leta na jednom izrael-skom helikopteru početkom juna meseca.

Kako je saopšteno, to je kontrolna mera predostrožnosti koja će trajati 30 minuta po helikopteru. Ukoliko se pokaže potrebnim, zamena repnog rotora po letelici koštala bi 40 000 dolara.

Helikopter AH-64 više puta je povlačen radi provere, a poslednji put samo pre 6 meseci, zbog neispravnosti lopatica repnog rotora na nekoliko letelica. Za sada se ne može tačno proceniti koliko će ova provera trajati, ali sve dok se ne završi, letovi će se sprovoditi restriktivno.

M. K.

\* Prema podacima iz časopisa Defence Systems Daily, 29. jun 2001.



## MOTORI EJ200 ZA EUROFAJTER\*

Rolls-Royce je jula 2001. godine objavio da je isporučio prvi serijski motor za evropski lovac Eurofajter (Eurofighter). Za prvu seriju od 148 ovih lovaca biće isporučeno 363 motora, a navedenih 1000 biće isporučeno do 2015. godine. Prema trenutnim procenama ovi motori biće pogonska grupa za ukupno 620 Eurofajtera.

Sa motorom EJ200 Rolls-Royce je zadovoljio zahteve za pogonsku grupu najnovije generacije borbenih aviona vrhunskih performansi. To je turboventilatorski motor sa naknadnim sagorevanjem, čija je kontrola ostvarena sistemom

\* Prema podacima sa [www.defence-data.com](http://www.defence-data.com)

FADEC (Full authority digital engine control).

U odnosu na motore prethodne generacije, odlikuje se manjim dimenzijama, većim odnosom potisak-masa i manjom potrošnjom goriva, što su najznačajniji faktori za povećanje borbenih mogućnosti savremenih aviona.

S. V



## PRVI LET HELIKOPTERA APAČ LONGBOU\*

Prvi helikopter AH-64D Apač Longbou (Apache Longbow) nove serije, koja će u odnosu na prethodne serije D biti opremljena određenim poboljšanjima, poleteo je jula 2001. godine.

Ovaj model, čiji je prvi let trajao 23 minuta, poseduje integrisana nova rešenja koja su već ispitana i primenjena na drugim projektima, a imaju za cilj da smanje nabavnu cenu i buduće operativne troškove. Istovremeno, na optimalan način odgovara se na vizije američke armije o digitalizovanom bojištu.

Prvi let nove verzije helikoptera nije označio samo početak sprovođenja nove, višegodišnje etape kojom će biti isporučeno 269 naručenih helikoptera. Ovim inovacijama proizvođaču se pruža mogućnost da Apača održi na tržištu i u narednim dekadama.

Serijska proizvodnja nove varijante planira se za početak 2002. godine. Prema planiranoj dinamici, do 2006. godine bi u redovima američkog armijskog vazduhoplovstva trebalo da se nađe ukupno 501 helikopter varijante D.

S. V.

\* Prema podacima sa [www.defence-data.com](http://www.defence-data.com)



## VOJNOIZDAVAČKI ZAVOD

11002 Beograd, Balkanska 53  
Telefoni: (011) 36-12-506, lok.: 23-495  
Telefaks: (011) 36-12-506

## NARUDŽBENICA

Pretplaćujemo se na časopise za 2002. godinu:

primeraka

### 1. Vojnotehnički glasnik

(stručni i naučni časopis VJ) izlazi dvomesečno.

Godišnja pretplata 560,00 dinara.

Prilikom uplate pozvati se na broj: 054/963

### 2. Novi glasnik

(vojnostručni intervidovski časopis) izlazi dvomesečno.

Godišnja pretplata 960,00 dinara.

Prilikom uplate pozvati se na broj: 053/963

### 3. Vojno delo

(opštevojni teorijski časopis) izlazi dvomesečno.

Godišnja pretplata 720,00 dinara.

Prilikom uplate pozvati se na broj: 051/963

Pretplatne cene važe do 31. 03. 2002. godine.

Broj primeraka izdanja koje se naručuje upisati u narudžbenicu i poslati na adresu:  
VOJNOIZDAVAČKI ZAVOD, Balkanska 53, 11002 Beograd.

Za pretplate fizičkih lica ne dostavljamo fakture. Poručioци uplaćuju iznos pretplate  
na žiro-račun broj **40818-637-9-6319 RC SMO Topčider - za VIZ (sa pozivom na broj  
za svaki časopis)** i šalju primerak uplatnice uz narudžbenicu.

Kupac ..... tel.: .....

Mesto ..... Ulica ..... br. ....

Dana .....

Potpis naručioca

M.P. ....

Vojnotehnički glasnik je stručni i naučni časopis Vojske Jugoslavije, koji objavljuje: originalne naučne radove, prethodna saopštenja, pregledne radove i stručne radove.

Svojom programskom koncepcijom časopis obuhvata sistem integralnog tehničkog obezbeđenja, tehniku vidova, rodova i službi, razvoj, tehnologiju, proizvodnju i upotrebu sredstava NVO, kao i teoretska i praktična dostignuća, koja doprinose razvoju vojne misli i usavršavanju pripadnika Vojske Jugoslavije.

Članak se dostavlja Redakciji u dva primerka, a treba obavezno da sadrži: propratno pismo sa kratkim sadržajem članka, spisak grafičkih priloga, spisak literature i podatke o autoru.

U propratnom pismu treba istaći o kojoj vrsti članka se radi, koji su grafički prilozi originalni, a koji pozajmljeni.

Članak treba da sadrži rezime (u najviše osam do deset redova), i ključne reči na srpskom i engleskom jeziku, uvod, razradu i zaključak. Obim članka treba da bude do jednog autorskog tabaka (16 stranica sa dvostrukim proredom). Tekst mora biti jezički i stilski doteran, sistematizovan, bez daktilografskih grešaka, bez skraćenica (osim standardnih), uz upotrebu stručne terminologije. Sve fizičke veličine moraju biti izražene u Međunarodnom sistemu mernih jedinica – SI. Redosled obrazaca (formula) označavati rednim brojevima, sa desne strane u okruglim zagradama. Fotografije i crteži treba da budu jasni, pregledni i pogodni za reprodukciju. Ne treba ih lepiti, već samo naznačiti njihovo mesto u tekstu. Crteže treba raditi u pogodnoj računarskoj grafici. Tabele treba pisati na isti način kao i tekst, a označavati ih rednim brojevima sa gornje strane.

Spisak grafičkih priloga treba da sadrži naziv slike – crteža i nazive pozicija.

Literatura u tekstu navodi se u uglastim zagradama, a spisak korišćene literature sadrži neophodne bibliografske podatke prema redosledu citata u tekstu. Bibliografski podatak za knjigu sadrži prezime i inicijale imena autora, naziv knjige, naziv izdavača, mesto i godinu izdavanja. Bibliografski podatak za časopis sadrži prezime i ime autora, naslov članka, naziv časopisa, broj i godinu izdavanja. Opširan pregled literature neće se prihvatiti.

Svi radovi podležu stručnoj recenziji, a objavljeni radovi i stručne recenzije se honorišu prema važećim propisima VJ.

Podaci za autora sadrže: ime i prezime, čin, zvanje, adresu radne organizacije (VP), kućnu adresu, telefon na radnom mestu i kućni telefon, žiro-račun banke i SO mesta stanovanja.

Rukopise slati na adresu: Redakcija „Vojnotehničkog glasnika“, 11002 Beograd, Balkanska 53, VE-1.

REDAKCIJA

*Tehničko uređenje*

Branko Marković

*Lektor*

Dobriła Miletić, profesor

*Korice*

Milojko Milinković

*Korektor*

Bojana Uzelac

Cena: 100,00 dinara

Tiraž 1200 primeraka

---

Na osnovu mišljenja Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj Republike Srbije, broj 413-00-1201/2001-01 od 12. 09. 2001. godine, časopis „Vojno-tehnički glasnik“ je publikacija od posebnog interesa za nauku.

---

UDC: Centar za vojnonaučnu dokumentaciju i informacije (CVNDI)